



João Miguel Barateiro Almeida Botas

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

***Grouts de cal hidráulica natural
incorporando fibras de polipropileno e
microesferas de vidro: caracterização física
e mecânica***

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Luís Gonçalo Correia Baltazar, Professor
Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia,
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professora Doutora Ildi Cismasiu
Arguente: Professora Doutora Maria Paulina S. F. Faria Rodrigues
Vogal: Professor Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar

“Copyright” João Miguel Barateiro Almeida Botas, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Primeiramente, vou expressar um enorme agradecimento ao meu orientador, Professor Luís Baltazar, não só por me ter aceite mas, também, por ter confiado em mim para desenvolver este trabalho. O seu constante acompanhamento ao longo de todo o trabalho, o seu enorme conhecimento e experiência acerca do tema, a sua disponibilidade para esclarecer dúvidas surgidas e as suas importantes sugestões propiciaram um óptimo desenvolvimento do trabalho.

De seguida, quero agradecer ao Engenheiro Vítor Silva, pelo apoio prestado nos ensaios laboratoriais decorridos no DEC, ao CENIMAT/i3N pela disponibilidade dos seus equipamentos e laboratório e à Escola Superior de Tecnologia do Barreiro pela disponibilidade dos equipamentos referentes aos ensaios mecânicos e pela simpatia e disposição do Engenheiro Alexandre Gamito.

Quero aqui deixar um obrigado a todos os meus amigos e colegas de curso por todos os momentos passados e pela cooperação ao longo destes anos.

Nunca esquecendo o apoio dado em todas as circunstâncias, a motivação e a compreensão proporcionadas ao longo de todo este trabalho, quero agradecer à minha família e namorada por tudo. Sem eles, com certeza, tudo seria mais difícil.

Em homenagem póstuma à minha avó Albertina, uma pessoa com uma enorme força, carácter e ideais, tornou-se um grande exemplo de vida. A ela dedico esta dissertação.

Resumo

Nos dias de hoje, a conservação do património edificado de carácter histórico ou não é cada vez mais importante. A maioria dos edifícios antigos apresenta como solução construtiva as alvenarias de pedra de múltiplos panos. Embora tratando-se de uma solução construtiva duradora, apresenta fragilidades que condicionam o comportamento estrutural dos edifícios, nomeadamente pela elevada heterogeneidade de materiais e a reduzida ou inexistente ligação entre elementos/panos, ou seja, um fraco comportamento monolítico.

A injeção de *grouts*, também denominados de caldas, é uma das técnicas mais eficazes em consolidação de alvenarias antigas. Consiste no incremento de compacidade, criação de ligações entre os vários elementos/panos da alvenaria de pedra e a reposição do seu comportamento monolítico. No entanto, requer cuidados rigorosos na sua intervenção, pois tem de existir compatibilidade entre os *grouts* injectados e os materiais originais, uma vez que esta técnica não é reversível, pelo que um *grout* mal formulado pode consequentemente danificar o edificado. Tendo em vista a compatibilidade neste estudo, optou-se pela utilização de *grouts* à base de cal hidráulica natural, devido à sua familiaridade mecânica, física e química com os materiais originais das alvenarias antigas.

A caracterização das propriedades físicas e mecânicas de *grouts* de injeção é fundamental para obter informações sobre o seu comportamento durante o processo de injeção e em condições de serviço. Assim, no presente estudo, realizou-se um ensaio no estado fresco, visando a obtenção das propriedades reológicas, e no estado endurecido, caracterizando o processo de hidratação, a resistência mecânica e a durabilidade à acção de cloretos. Demonstrou-se assim, a influência das diferentes dosagens de fibras de polipropileno e de microesferas ocas de vidro no comportamento dos *grouts*. Neste contexto, foi realizado um estudo prévio para a formulação dos *grouts* e consideram-se três diferentes dosagens de fibras de polipropileno e de microesferas ocas de vidro (em separado), todos eles incorporando uma pequena dosagem de superplastificante em pó.

Após este estudo foi possível concluir-se que adição de fibras de polipropileno e de microesferas ocas de vidro prejudicam as propriedades reológicas analisadas, entre elas a viscosidade plástica, a tensão de cedência e a consistência. Em relação ao estado endurecido, a grande maioria dos parâmetros avaliados verificaram melhorias com a incorporação de fibras de polipropileno e de microesferas ocas de vidro.

Termos Chave: *grout*, microesfera oca de vidro, fibra de polipropileno, superplastificante, cal hidráulica natural, reologia.

Abstract

Nowadays, the preservation of built heritage – both historical and non-historical - is increasingly important. Most of the old buildings use multi-leaf stone masonry as a constructive solution. This type of constructive solution very often shows structural weaknesses due to its high heterogeneity and reduced or nonexistent connection between constituent elements, which leads to a poor monolithic behavior.

Injection of grouts is one of the most effective techniques for consolidation of old stone masonry walls. It aims to increase the compactness of the masonry by creating connections between the various elements/leaves of stone masonry and restores its monolithic behavior. However, this technique requires a careful design, for instance the compatibility between the grouts and the original materials must be ensured, since this technique is not reversible and an improper grout composition can consequently damage the building. In view of the compatibility between materials, in this study grouts based on natural hydraulic lime were chosen due to their mechanical, physical and chemical compatibility with the original materials of the old rubble stone masonries.

The characterization of the physical and mechanical properties of injection grouts is essential to obtain information about their behavior during the injection process and under service conditions. Thus, in the present study, a fresh state test was carried out, in order to obtain the rheological properties, and in the hardened state, characterizing the hydration process, the mechanical resistance and the durability to the action of chlorides. The influence of the different dosages of polypropylene fibers and hollow glass microspheres on the behavior of grouts was thus demonstrated. In this context, a previous study was carried out to formulate the grouts and three different dosages of polypropylene fibers and hollow glass microspheres (separately) were considered, all of them incorporating a small dosage of superplasticizer powder.

It was concluded that the addition of polypropylene fibers and hollow glass microspheres impairs all the rheological properties analyzed, including plastic viscosity, yield stress and consistency. Regarding the hardened state, the great majority of the evaluated parameters verified improvements with the incorporation of polypropylene fibers and hollow glass microspheres.

Keywords: grout, hollow glass microsphere, polypropylene fiber, superplasticizer, natural hydraulic lime, rheology.

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Enquadramento do tema.....	1
1.2.	Objectivos.....	2
1.3.	Estrutura e organização da dissertação	2
2.	Injecção de <i>grouts</i> na consolidação de alvenarias incorporando microtecnologia	5
2.1.	Alvenaria de pedra antiga	5
2.1.1.	Caracterização.....	5
2.1.2.	Tipologia	6
2.1.3.	Materiais	7
2.1.4.	Fragilidades das alvenarias de pedra antigas	11
2.2.	<i>Grouts</i> de injecção em alvenarias	13
2.2.1.	Requisitos de desempenho	13
2.2.2.	Formulação dos <i>grouts</i>	14
2.3.	Microtecnologia.....	16
2.3.1.	Microesferas ocas de vidro.....	16
2.3.2.	Fibras de polipropileno	18
2.4.	Noções de reologia	19
2.4.1.	Parâmetros reológicos no âmbito da injecção de <i>grouts</i>	21
2.4.2.	Tipos de fluidos.....	22
3.	Métodos e procedimentos experimentais	25
3.1.	Planificação da campanha experimental	25
3.2.	Materiais.....	26
3.2.1.	Cal hidráulica natural (NHL)	26
3.2.2.	Superplastificante (SP).....	27
3.2.3.	Microesferas ocas de vidro (ME)	27
3.2.4.	Fibras de polipropileno (PP)	30
3.3.	Procedimento de amassadura.....	31
3.3.1.	Composição dos <i>grouts</i>	31
3.3.2.	Execução dos <i>grouts</i>	32

3.3.3.	Construção dos moldes dos provetes.....	33
3.3.4.	Condições de cura	33
3.4.	Ensaio reológico.....	34
3.5.	Ensaio realizado no estado endurecido	35
3.5.1.	Resistência à tração por flexão.....	36
3.5.2.	Resistência à compressão	38
3.5.3.	Resistência ao ataque por cloretos.....	39
3.5.4.	Absorção de água por capilaridade	40
3.5.5.	Secagem	42
3.5.6.	Porosidade aberta e massa volúmica	43
3.5.7.	Termogravimetria.....	46
4.	Apresentação e discussão de resultados	47
4.1.	Medições reológicas	47
4.2.	Ensaio realizado no estado endurecido	52
4.2.1.	Resistência à tração por flexão.....	52
4.2.2.	Resistência à compressão	53
4.2.3.	Resistência ao ataque por cloretos.....	54
4.2.4.	Absorção de água por capilaridade	56
4.2.5.	Secagem	58
4.2.6.	Porosidade aberta e massa volúmica	61
4.2.7.	Termogravimetria.....	62
4.3.	Síntese dos resultados.....	64
5.	Conclusões.....	67
5.1.	Conclusões gerais	67
5.2.	Desenvolvimentos futuros.....	68
	Referências bibliográficas.....	71
	Anexo	77

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Tipos de secção em paredes de alvenaria.....	6
Figura 2.2 - Tipo de aparelho	6
Figura 2.3 - Tipos de assentamento de alvenarias de pedra).....	7
Figura 2.4 - Diagrama esquemático de tipos de cais	8
Figura 2.5 - Ciclo da cal	10
Figura 2.6 - Colapso de pano exterior provocado por desagregação	11
Figura 2.7 - Ascensão de água por capilaridade.....	13
Figura 2.8 - Tipos de repulsão.....	15
Figura 2.9 - Fenómeno de retrorreflexão	16
Figura 2.10 - Microesferas ocas de vidro.....	17
Figura 2.11 - Exemplos de fibras poliméricas	18
Figura 2.12 - Modelo de placas paralelas	21
Figura 2.13 - Ilustração da geometria utilizada em reómetros rotacionais	21
Figura 2.14 - Curvas de fluxos para diferentes tipos de fluidos	23
Figura 3.1 - Esquema sequencial dos ensaios no estado endurecido	26
Figura 3.2 – Microesferas ocas de vidro	27
Figura 3.3 - Microscópio (OLYMPUS - SZH10).....	28
Figura 3.4 - Agitador mecânico - Ensaio de peneiração.....	28
Figura 3.5 - Curva granulométrica das microesferas ocas de vidro	29
Figura 3.6 - Anomalias verificadas nas microesferas ocas de vidro	30
Figura 3.7 - Fibras de polipropileno agregadas (1,5 gramas)	30
Figura 3.8 - Fibras de polipropileno desagregadas (1,5 gramas)	31
Figura 3.9 - Adição das fibras de polipropileno	32
Figura 3.10 - Colocação do grout no molde	33
Figura 3.11 - Provetes após a desmoldagem	33
Figura 3.12 - Reómetro rotacional (Gemini HRnano da Bohlin Instruments).....	34
Figura 3.13 - Prensa hidráulica MATEST - E183 e controle "SERVOTRONIC"	36
Figura 3.14 - Ensaio de resistência à flexão por tracção.....	37
Figura 3.15 - Ensaio de resistência à compressão.....	38
Figura 3.16 - Imersão dos provetes na solução de cloreto de sódio	39
Figura 3.17 - Impermeabilização dos provetes	41
Figura 3.18 - Ensaio de capilaridade	41
Figura 3.19 - Colocação do provetes no interior do exsiccador.....	44
Figura 3.20 - Introdução de água no interior do exsiccador	44
Figura 3.21 - Pesagens de massas hidrostáticas e saturadas.....	45
Figura 3.22 - Equipamento termogravimétrico (NETZSCH 449 F3 Júpiter)	46
Figura 4.1 - Comportamento reofluidificante referente a cada <i>grout</i>	47
Figura 4.2 - Curvas de fluxo e recta de aproximação referentes a cada <i>grout</i>	48

Figura 4.3 - Ajustamento dos modelos à curva de fluxo do <i>grout</i> de referência (Ref.) e respectivas equações das linhas de tendência.....	48
Figura 4.4 - Valores dos coeficientes de viscosidade plástica - modelo Bingham.....	49
Figura 4.5 - Valores da tensão de cedência para cada <i>grout</i> – modelo de Herschel-Bulkley	50
Figura 4.6 - Valores da consistência - modelo de Herschel-Bulkley	51
Figura 4.7 - Resultados do ensaio à tracção por flexão	52
Figura 4.8 - Ruptura de provete referente ao <i>grout</i> com adição de fibras de polipropileno.....	52
Figura 4.9 - Resultados do ensaio à compressão	53
Figura 4.10 - Variação de massa ao longo dos ciclos	54
Figura 4.11 - Evolução da degradação dos provetes	55
Figura 4.12 - Curvas de absorção de água por capilaridade - PP	56
Figura 4.13 - Curvas de absorção de águas por capilaridade - ME	57
Figura 4.14 - Valores dos coeficientes de absorção de água por capilaridade - PP.....	57
Figura 4.15 - Valores dos coeficientes de absorção de água por capilaridade - ME	58
Figura 4.16 - Curvas de secagem - Fibras de polipropileno	59
Figura 4.17 - Curvas de secagem – Microesferas ocas de vidro	59
Figura 4.18 - Taxa de secagem - Fibras de polipropileno.....	60
Figura 4.19 - Taxa de secagem – Microesferas ocas de vidro	60
Figura 4.20 - Resultados do ensaio de massa volúmica	61
Figura 4.21 - Resultados do ensaio de porosidade aberta	62
Figura 4.22 - Curvas DTG referentes aos diferentes tipos de <i>grouts</i>	63
Figura 4.23 - Curvas DTG - Desidroxilação do hidróxido de cálcio.....	63

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Características da cal hidráulica natural da Secil (NHL 5) (Sequeira, 2007)	26
Tabela 3.2 – Características do superplastificante de acordo com o fabricante.....	27
Tabela 3.3 - Características das microesferas ocas de vidro de acordo com o fabricante	27
Tabela 3.4 - Dados curva granulométrica das microesferas ocas de vidro	29
Tabela 3.5 - Características das fibras de polipropileno de acordo com o fabricante.....	31
Tabela 3.6 - Formulações dos grouts indicadas em percentagens mássicas e em massa	32
Tabela 4.1 - Graduação da degradação dos grouts	55
Tabela 4.2 - Resumo e avaliação dos resultados obtidos através dos ensaios	64

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Ap - Área de aplicação

CENIMAT|i3N - Centro de Investigação de Materiais

DCM - Departamento de Ciências dos Materiais

DEC - Departamento de Engenharia Civil

DTG –Termogravimetria Derivada

EN - Norma Europeia

F - Força tangencial

FCT - Faculdade de Ciências e Tecnologias

Fp - Força aplicada

H - Altura

ME - Microesferas ocas de vidro

M₀ - Massa no instante inicial

M_i – Massa num determinado instante

M₁ - Massa seca

M₂ - Massa húmida

M₃ - Massa saturada

NHL - Cal Hidráulica Natural

NP - Norma Portuguesa

PCE - Policarboxilato

PP - Fibras de polipropileno

S - Área de contacto

SNF - Condensado de naftaleno-formaldeído sulfonado

SP - Superplastificante

TG - Termogravimetria

TS - Taxa de secagem

UNL - Universidade Nova de Lisboa

V - Velocidade

V_{máx} - Velocidade máxima

τ - Tensão de corte

σ_0 - Tensão de cedência

$\dot{\gamma}$ - Taxa de corte

η - Viscosidade plástica

σ - Tensão

ΔVM - Variação de massa

1. Introdução

1.1. Enquadramento do tema

O Património histórico edificado de Portugal e de várias cidades europeias, tem enaltecido o interesse por parte dos turistas. Tal levou a uma crescente aposta por parte da União Europeia no financiamento da conservação e promoção desse património (Comissão Europeia, 2014).

Em Portugal, a maioria dos edifícios históricos apresentam-se num estado de degradação considerável, necessitando de intervenções de conservação urgentes. “O termo «conservação» engloba todo o conjunto de acções destinadas a prolongar o tempo de vida duma edificação histórica” (Henriques, 1991). Os edifícios antigos pertencem ao património cultural das cidades, incrementando, assim, a necessidade de garantir a sua preservação e a sua autenticidade. As intervenções de conservação requerem uma análise e conhecimento acerca da época de construção do edifício e dos processos construtivos utilizados, de forma a realizar uma boa intervenção. Uma boa intervenção não deve comprometer a autenticidade ou compatibilidade entre materiais, pois não deve por em causa o valor patrimonial do edificado, como referido nas cartas de Atenas e Veneza.

O presente estudo recai sobre uma técnica de conservação de paredes antigas em alvenaria de pedra constituídas por múltiplos panos. Estas tipicamente contemplam dois panos exteriores de pedra aparelhada ou não e um núcleo interno heterogéneo, preenchido com materiais pouco coesivos (Valluzzi *et al.*, 2004). Essa heterogeneidade e falta de coesão origina um elevado volume de vazios no interior das paredes, tornando-o mais vulnerável à ocorrência de anomalias no núcleo interno. Para colmatar essas anomalias, recorre-se na grande maioria dos casos à técnica de injeção de *grouts* para consolidação de paredes através do preenchimento de vazios e fissuras existentes.

A incorporação de fibras de polipropileno em argamassas e betões tem sido bastante usual no presente e tem sido exaustivamente abordado em outros estudos no sentido de melhorar o seu comportamento relativamente a módulos de elasticidade, resistência ao choque, fendilhação, durabilidade, fadiga, resistência ao impacto e abrasão, retracção, expansão, comportamento térmico e resistência ao fogo (Sana *et al.*, 2018; Moreira, 2018), no entanto, em *grouts* de injeção existe pouca informação sobre a sua adição.

As microesferas ocas de vidro são principalmente utilizadas nas superfícies como reflectores de luz, embora já existam alguns estudos da sua incorporação em betões (Shahidan *et al.*, 2016). Que se tenha conhecimento, a adição de microesferas ocas de vidro em *grouts* de injeção é um estudo sem antecedentes.

O presente estudo surge no âmbito de outros trabalhos realizados no DEC/FCT/UNL (Cardoso, 2018; Gouveia, 2017; Gomes, 2016; Cardoso, 2015; Guerreiro, 2014 e Matos, 2013), onde se avaliou a incorporação de diferentes materiais, como a micro e nano-sílica, o policarboxilato e o hidrófugo natural, sujeitos a diferentes ensaios e procedimentos. Este estudo tem o intuito de otimizar a técnica de injeção de *grouts*, nomeadamente a sua formulação. Desta forma, fornece-se informações relevantes na procura de uma boa formulação de *grouts*, podendo também ajudar em futuros estudos.

1.2. Objectivos

O presente estudo tem como principal objectivo contribuir para o desenvolvimento do conhecimento relativo à injeção de *grouts* em paredes de alvenaria de pedra de múltiplos panos, utilizando fibras de polipropileno e microesferas ocas de vidro. Como tal, é feita a caracterização das propriedades físicas e mecânicas de *grouts* de injeção, revelando-se fundamental para obter informações sobre o seu comportamento durante o processo de injeção e em condições de serviço. Neste sentido, a presente dissertação tem por objectivo estudar a influência de diferentes dosagens de fibras de polipropileno e microesferas ocas de vidro nas propriedades frescas e endurecidas de *grouts* para consolidação de alvenarias antigas.

1.3. Estrutura e organização da dissertação

Esta dissertação foi dividida em cinco capítulos, bibliografia e um anexo. Em seguida é feita uma breve descrição dos assuntos abordados em cada capítulo.

No primeiro capítulo é elaborado um enquadramento do tema, as motivações e objectivos que promoveram o presente estudo e é referida a estrutura e organização do documento.

No segundo capítulo é descrito de forma sintética o estado do conhecimento. Oferece-se um conhecimento geral sobre o tema, dando mais ênfase ao que o presente trabalho apresenta de inovador, em relação a trabalhos anteriormente realizados neste âmbito.

No terceiro capítulo é descrita a campanha experimental onde são explanados os procedimentos dos ensaios realizados, iniciando-se este capítulo com o processo de formulação e produção dos *grouts*.

No quarto capítulo são expostos os resultados obtidos através dos ensaios descritos no capítulo anterior e são discutidos os resultados comparativamente com estudos do mesmo âmbito.

Por último, são feitas conclusões e sugeridos novos desenvolvimentos futuros.

Em anexo encontra-se a comunicação intitulada “*Rheological characterization of injection grouts proportioned with glass microspheres and polypropylene fibers*” apresentada sob a forma de poster na conferencia AERC 2019 (The Annual European Rheology Conference) em Portorož, Slovenia, 8-11 Abril de 2019, que contempla os resultados alusivos à caracterização reológica dos *grouts* estudados no âmbito desta dissertação.

2. Injecção de *grouts* na consolidação de alvenarias incorporando microtecnologia

2.1. Alvenaria de pedra antiga

As paredes de alvenaria de pedra antigas são essencialmente constituídas por materiais cuja aquisição foi maioritariamente feita num local próximo da construção ou proveniente da escavação e/ou regularização do terreno. São paredes constituídas por pedras de tamanhos e formas irregulares e diversas, assentes em argamassas de cal aérea.

Este capítulo irá focar-se apenas no contexto do tema, dando mais ênfase ao tipo de paredes onde a intervenção utilizando a técnica de injecção de *grouts* é mais usual. Sendo elas as paredes de alvenaria de múltiplos panos, será abordada a sua caracterização, tipologia, os seus materiais constituintes e as suas diversas fragilidades.

2.1.1. Caracterização

No caso das alvenarias de múltiplos panos, a sua seção é composta por dois panos de pedra resistentes externos e um espaço interior ocupado por pequenas pedras, areia, argamassa e outro tipo de materiais desagregados.

Analisando bibliograficamente vários artigos realizados por Binda *et al.* (1997, 2000 e 2002), obteve-se as principais características das paredes de alvenaria, sendo elas:

- a heterogeneidade de materiais;
- a falta de adesão entre pano exterior e pano interior;
- a elevada espessura e o seu peso próprio;
- o elevado número de espaço de vazios;
- o elevado teor de humidade;
- a elevada inércia térmica;
- a elevada resistência à compressão;
- a reduzida resistência à tracção entre juntas;
- poder ou não possuir rebocos;
- a sua execução morosa.

2.1.2. Tipologia

As paredes de alvenarias de pedra apresentam diversificadas constituições e tipologias. As pedras utilizadas podem ter diferentes formas e tamanhos, as juntas entre pedras podem ser alinhadas ou desalinhadas e o assentamento das pedras pode ser feito de várias formas.

As paredes em alvenarias de pedra devem ser classificadas mediante o seu tipo de secção, sendo que uma prévia boa classificação é extramente importante no acto da injeção de *grouts*. Na Figura 2.1, pode-se observar os vários tipos de secção.

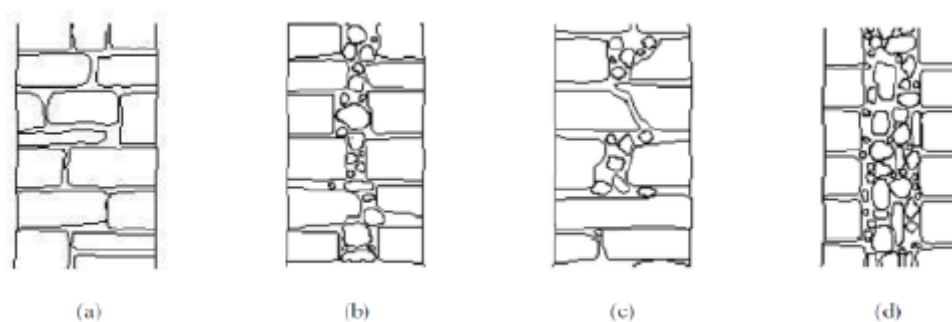


Figura 2.1 - Tipos de secção em paredes de alvenaria. (a) Pano simples; (b) pano duplo sem ligação; (c) pano duplo com ligação (d) pano triplo (Pagaimo 2004)

Usualmente a classificação das paredes de alvenaria de pedra é realizada tendo em conta o tipo de assentamento e o tipo de aparelho/acabamento. Estas classificações avaliam a disposição e regularidade das superfícies de assentamento. O tipo de aparelho avalia as juntas enquanto que o tipo de assentamento avalia a forma e disposição com que as pedras foram assentes. O aparelho pode ser classificado, como se pode observar na Figura 2.2.

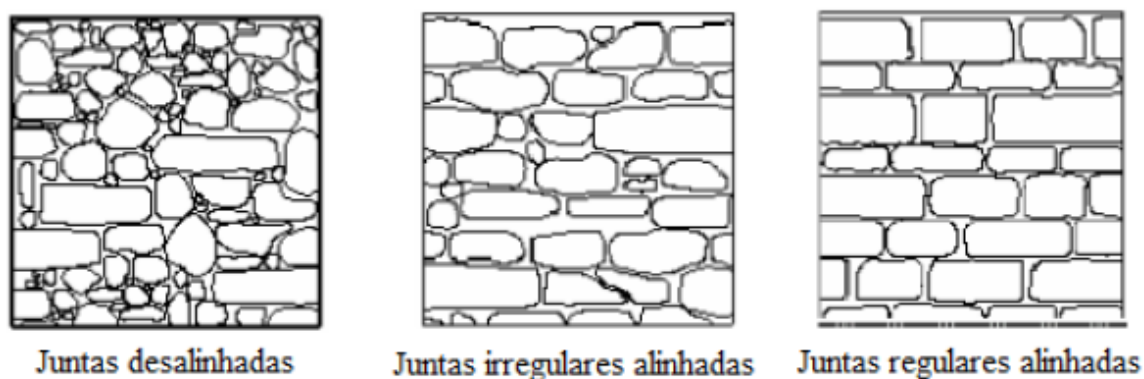
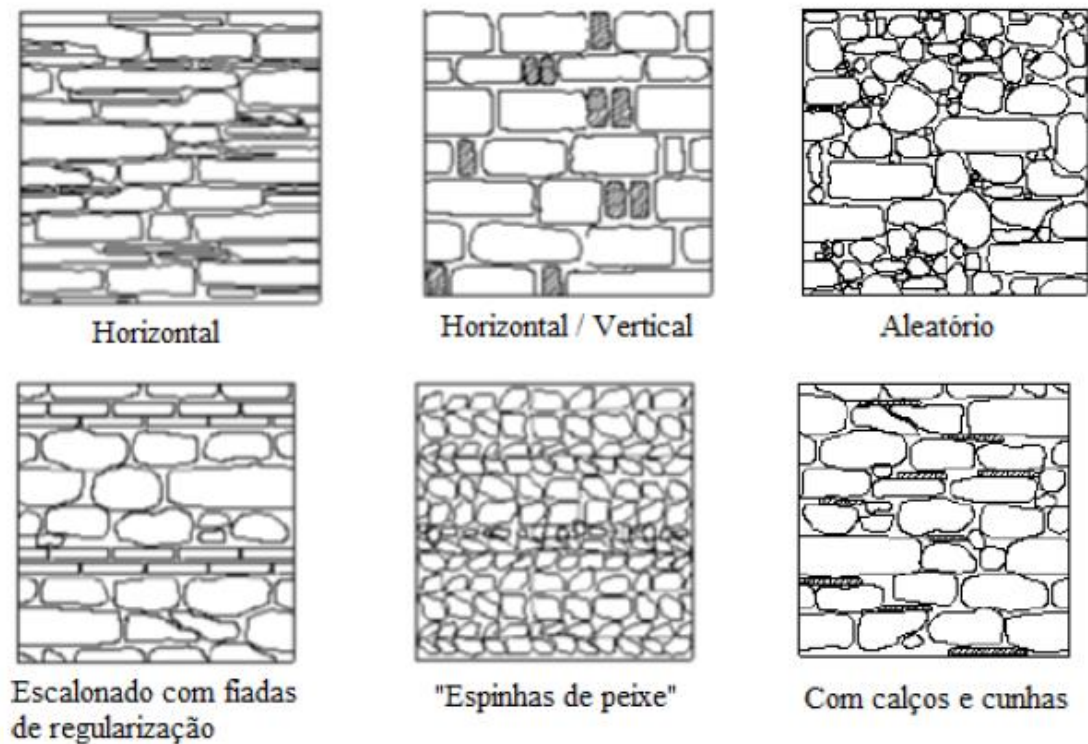


Figura 2.2 - Tipo de aparelho (adaptado de Pagaimo (2004))



Relativamente ao tipo de assentamento das pedras, apresenta-se na figura 2.3 os vários tipos.

Figura 2.3 - Tipos de assentamento de alvenarias de pedra (adaptado de Pagaimo (2004))

2.1.3. Materiais

- **Pedra**

Em muitas regiões a pedra é o material dominante nas paredes antigas de alvenaria. Devido à sua elevada resistência mecânica e durabilidade, mas também pelo facto de em alguns casos ser um material de fácil acesso e possuir uma beleza estética própria.

Não só em Portugal, mas em todo o mundo, a escolha do tipo de pedra é realizada em função da localização geográfica, da disponibilidade de recursos e do tipo de construção. No norte do país, é usual a presença de granito em Trás-os-Montes, nas Beiras o xisto e o calcário nas regiões centro e Alentejo. Ainda assim, pode-se encontrar algumas exceções quanto ao tipo de material face à localização, pois quando o dono de obra apresentava grande poderio económico os materiais eram transportados ao longo de grandes distâncias.

A pedra continua a ser um material de eleição, mas também apresenta algumas anomalias estruturais e estéticas, quando exposta às acções ambientais e ao desgaste por utilização. Nas localidades onde não existia pedra utilizava-se a terra como material dominante.

- **Argamassa**

A principal função da argamassa é o preenchimento dos espaços vazios, conferindo uma ligação entre os elementos constituintes da parede. Uma argamassa consiste numa mistura de água, ligante e agregados, podendo existir algumas adições.

Nas construções antigas, era utilizada a cal aérea como ligante. Com a evolução dos ligantes, o cimento começou a ser utilizado nas argamassas em intervenções de reabilitação e conservação de edifícios, e consequentemente, surgiram algumas anomalias devido a uma menor compatibilidade entre materiais (Martinez *et al.*, 2013). O surgimento da cal com propriedades hidráulicas, veio comprovar ser um óptimo tipo de ligante a usar na conservação pois, face à cal aérea, tem como vantagens o facto de ganhar presa e endurecer debaixo de água e face ao cimento tem uma maior compatibilidade com a cal aérea.

A título de resumo apresenta-se na Figura 2.4 o diagrama esquemático de tipos de cal.

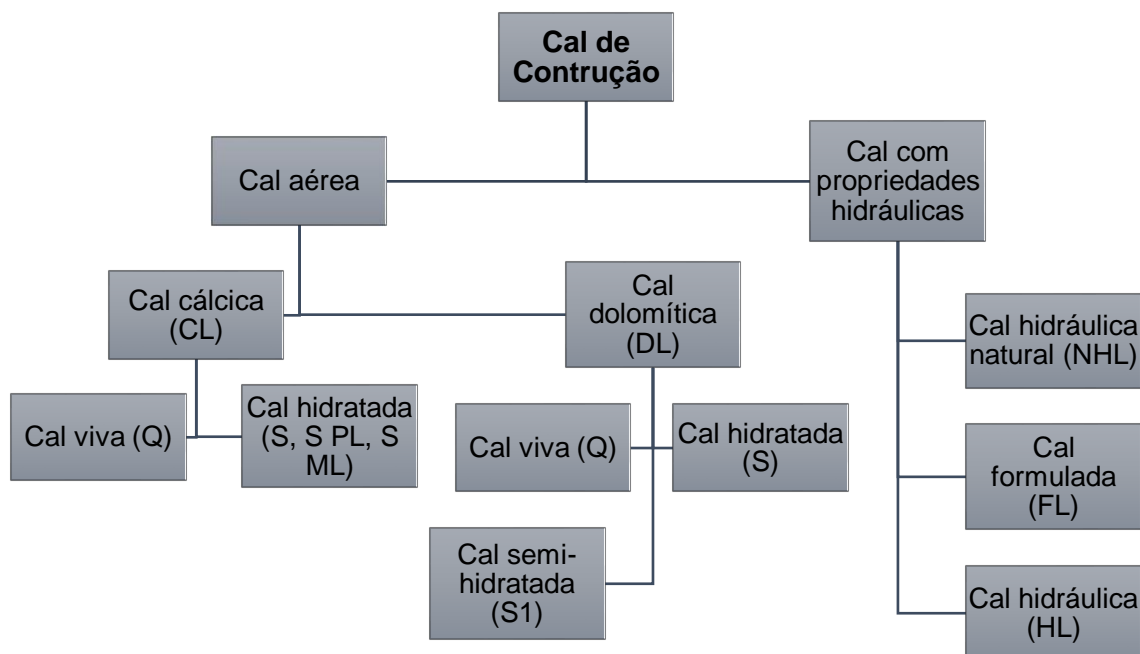


Figura 2.4 - Diagrama esquemático de tipos de cals (adaptado de CEN (2010))

Em que:

- S PL - Cal em pasta (extinção da cal viva por imersão em água abundante);
- S ML - Leite de cal (por diluição da pasta em água);
- S - Cal hidratada em pó (por aspersão);
- S1 - Cal semi-hidratada em pó seco;
- Q - Cal viva em pó seco ou grânulos.

A cal provém do óxido e/ou hidróxido de cálcio e óxido e/ou hidróxido de cálcio e magnésio produzidos pela decomposição térmica, designada de calcinação, de carbonato de cálcio natural (por exemplo calcário, giz, conchas) ou carbonato de magnésio cálcico natural (por exemplo calcário dolomítico e dolomite).

Segundo a EN 459-1:(2010) pode-se definir os diferentes tipos de cais com propriedades hidráulicas da seguinte forma:

- **Cal hidráulica (HL):** consiste em cal e outros materiais como cimento, escória de alto forno, cinza, filamento de calcário e outros materiais adequados;
- **Cal hidráulica natural (NHL):** cal com propriedades hidráulicas produzidas pela queima de calcários mais ou menos argilosos ou silicosos (incluindo giz) com redução de pó por extinção com ou sem moagem;
- **Cal formulada (FL):** consiste principalmente em cal cálcica e/ou cal hidráulica natural com adição de material hidráulico e/ou pozzolânico.

As cais com propriedades hidráulicas possuem a propriedade de ganhar presa e endurecer debaixo de água, sendo que, o dióxido de carbono atmosférico também contribui para o seu endurecimento por reacção com o hidróxido de cálcio.

A cal com propriedades hidráulicas difere da cal aérea por ganhar presa e endurecer debaixo de água, e por ser obtida de calcários não puros, i.e., com percentagens variáveis de argilas.

Como já referido, o termo cal é referente ao óxido de cálcio (CaO), conhecido como cal viva, e é formado a partir da cozedura/calcinação de calcários virgens, designado de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), que depois de hidratado, resulta num composto designado por hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), conhecido como cal hidratada ou apagada. Por último a carbonatação resulta da reacção química da cal hidratada com o dióxido de carbono, dando novamente, origem a carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Pode-se observar todo este ciclo através da figura 2.5.

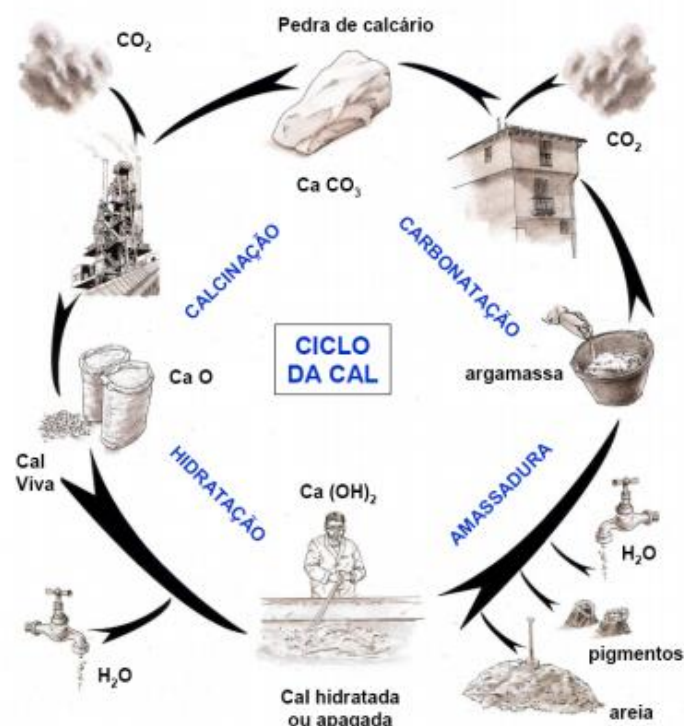
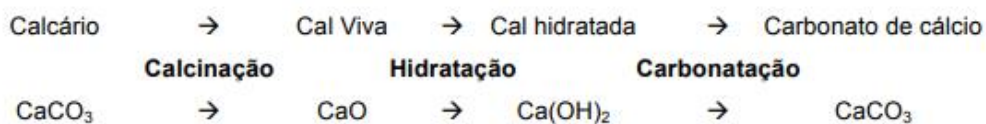


Figura 2.5 - Ciclo da cal (Pinto *et al.*, 2013)

O processo de fabrico da cal hidráulica é semelhante ao da cal aérea. Se esta for obtida por cozedura (inferior a 1250°C) de rocha calcária mais ou menos argilosa ou siliciosa, extintas e reduzidas a pó, com ou sem moagem, são designadas por cais hidráulicas naturais (NHL); sem adições de sulfatos e com um valor elevado de hidróxido de cal (Faria, 2012).

- **Agregados e adições**

A areia e as argila eram os materiais mais utilizados, para a elaboração das argamassas. Os tipos de construção face à utilização, à durabilidade e à impermeabilização da água, eram factores tidos em conta. Por esse facto, utilizavam-se materiais com propriedades hidráulicas ou impermeáveis, como as pozolanas, o pó de tijolo, o sebo e a borra de azeite.

As civilizações Grega e Romana descobriram que a calcinação de calcários margosos e alumino silicatos, resultava num material ligante que endurecia quando combinado com a água, aumentando a resistência mecânica das paredes de alvenaria. As cais hidráulicas artificiais, descobertas pelos Fenícios e aperfeiçoadas por Gregos e Romanos, eram obtidas misturando a cal com material pozolânico. Este material era bastante reactivo, devido à presença de sílica e alumina. As reacções pozolânicas são condicionadas pelas quantidades

disponíveis destes dois componentes (Faria *et al.*, 2012). Quando combinados com hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) de granulometria fina e na presença de água, geram silicatos e aluminatos de cálcio hidratado, com propriedades ligantes e cimentícias, superiores às das argamassas que não continham pozolanas (Rodríguez, 2012).

Segundo Theodoridou *et al.* (2013), existem dois tipos de pozolanas. A pozolana natural de origem vulcânica, utilizada há milhares de anos na produção de argamassas, e a pozolana artificial, produzida a partir de materiais naturais, tais como argila, após tratamento e submetida a altas temperaturas. Os tijolos triturados, na forma de fragmentos ou pó, são um exemplo comum de pozolanas artificiais, mas a natureza deste material de adição é considerada hidráulica com base nas reacções com o hidróxido de cálcio, e a subsequente formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratado, durante o processo de hidratação.

2.1.4. Fragilidades das alvenarias de pedra antigas

Com a exposição às acções ambientais, aos factores químicos, físicos, biológicos e ao desgaste por utilização, as paredes de alvenaria vão apresentando algumas anomalias, nomeadamente, desagregação dos materiais, fendilhação, fluência e ascensão de água por capilaridade.

- **Desagregação**

A deterioração do pano exterior e, à posteriori, do núcleo, proporciona o aumento do espaço de vazios. As ligações entre os panos ficam comprometidas e ocorre uma redução significativa da resistência mecânica da parede, podendo ocorrer o colapso de um dos panos exteriores, como se pode observar através da Figura 2.6.

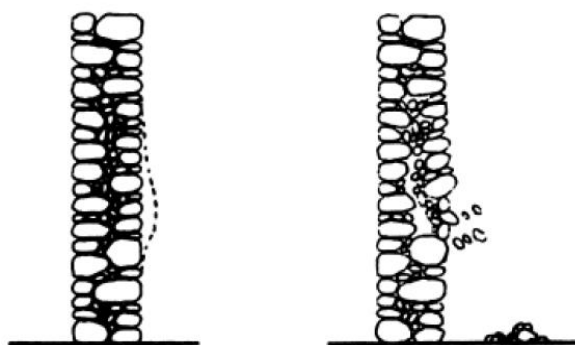


Figura 2.6 - Colapso de pano exterior provocado por desagregação (adaptado de Binda, 2000)

- **Fendilhação**

Esta anomalia é facilmente observada, pois a heterogeneidade das paredes assume diferentes comportamentos nos panos da parede, principalmente nos movimentos de corte, que promovem tensões de corte em toda a parede. É visível o aparecimento de fissuras e fendas à superfície da parede.

- **Fluência**

Este tipo de anomalia deve-se ao facto de a parede ao estar sujeita a elevadas cargas de compressão. Os diversos materiais constituintes da parede vão suportar e resistir de maneira diferente à carga aplicada. Derivado da fraca coesão do núcleo, verifica-se a redução da sua secção resistente e os esforços são encaminhados para os panos exteriores, apresentando maior capacidade de carga em relação ao núcleo, desta forma, os panos exteriores irão suportar uma parte da carga destinada ao núcleo, dando assim origem a fenómenos de fluência dos panos exteriores.

- **Ascensão de água por capilaridade**

A ascensão de água por capilaridade (Figura 2.7) origina o aparecimento de humidade. Esta constitui uma das principais causas de degradação dos edifícios, e pode apresentar-se de diversas formas como humidade do terreno, por fenómenos de higroscopicidade (Henriques, 2011).

Importa referir que a técnica de injeção de *grouts* à base de cal nas fundações destas paredes é prejudicial para a ascensão de água do terreno devido ao aumento de compacidade ao nível da fundação, sendo usual nestes casos a injeção localizada de resinas, ao nível do arranque da alvenaria, de forma a criar uma barreira impermeável que evite a ascensão de água por capilaridade.

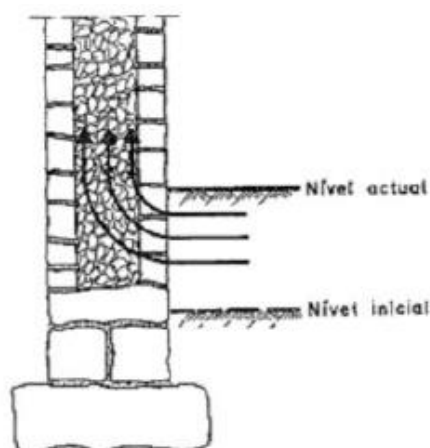


Figura 2.7 - Ascensão de água por capilaridade (adaptado de Henriques, 2011)

Para além destas anomalias mais frequentes, este tipo de alvenaria está sujeito a outros fenómenos de deterioração, devido a variações de temperatura, ventos fortes e ciclos gelo-degelo. Pode também, ser afectado, por deterioração química devido à cristalização dos sais solúveis ou devido ao fenómeno de deterioração biológica, provocada por microorganismos.

2.2. Grouts de injeção em alvenarias

Pode definir-se *grout* como uma suspensão de partículas de ligante em água, incluindo, em grande parte dos casos, adjuvantes e/ou adições, tendo como finalidade a injeção em alvenarias de panos múltiplos.

A técnica de injeção tem como objectivo aumentar a compacidade das alvenarias, repondo a ligação entre os panos exteriores e o núcleo e devolvendo o comportamento monolítico à alvenaria.

Sendo a injeção de *grouts* uma intervenção irreversível, por não permitir que o *grout* de preenchimento de vazios seja posteriormente removido, a sua concepção e método de aplicação em património histórico e cultural carece de uma série de requisitos de desempenho.

2.2.1. Requisitos de desempenho

Uma das maiores dificuldades na formulação da composição do *grout* é definir uma fluidez que se mantenha constante durante o período de injeção.

A fluidez do *grout* é afectada por vários parâmetros, como o tipo e a composição do *grout*, o tipo e dosagem de superplastificante, e a relação água/ligante, bem como as condições ambientais, a temperatura da água, o tempo de mistura, tipo de misturador e a sequência de mistura (Jorne, 2012).

As dosagens de superplastificante e a relação água/ligante (a/l) têm grande impacto na performance do *grout*. A relação a/l ideal deve ser aquela que integra simultaneamente as seguintes

características: menor segregação, menor viscosidade plástica e baixa tensão de cedência. Sendo assim, a variação da relação a/l é um factor determinante para o sucesso da injeção do *grout* (Baltazar *et al.*, 2013).

Contudo, o tipo de material constituinte do meio poroso onde se realiza a injeção, pode também, delinear o sucesso da injectabilidade, pois pode apresentar diferentes características, tais como a porosidade, tortuosidade dos vazios, a quantidade de partículas finas e a capacidade de absorção de água por parte destas (Jorne *et al.*, 2016).

2.2.2. Formulação dos *grouts*

No âmbito deste estudo, decorrem vários estudos sobre o tema, em prol de melhorar os requisitos referidos anteriormente.

A introdução nos *grouts* de materiais inovadores, tais como nano-partículas ou aditivos hidrófugos, de diferentes técnicas de mistura, entre outros, tem sido cada vez mais frequente, tendo em vista a optimização dos *grouts* (Cardoso, 2018, Gouveia, 2017, Cardoso, 2015).

O sucesso da injectabilidade está dependente da adequada dispersão das partículas aglutinantes na fase aquosa. A adição de estabilizadores e superplastificantes evita a coagulação e a segregação, mantendo uma fluidez constante durante o tempo de injeção e decresça rapidamente após esta (Gouveia, 2017).

- **Superplastificante**

Os superplastificantes têm a capacidade de aumentar a fluidez dos *grouts*, sem que seja obrigatório aumentar a quantidade de água. Com este comportamento optimiza-se a fluidez do *grout* e, conseqüentemente, a sua trabalhabilidade. É usualmente adicionado na fase de amassadura e em quantidades reduzidas, mas influencia notoriamente a trabalhabilidade da mistura.

Os superplastificantes mais usuais classificam-se de acordo com as seguintes composições e propriedades:

- Condensado de naftaleno-formaldeído sulfonado (SNF)
- Policarboxilato (PCE)

Os superplastificantes do tipo SNF têm acção dispersiva que resulta de uma repulsão electrostática, obtida pela ionização das partículas de ligante, dotando-as com um sinal de carga idêntico (Figura 2.8-(a)). Os superplastificantes do tipo PCE actuam através de

repulsão electrostática, complementada com repulsão estérica. Esta protege as partículas de ligante, entrepondo uma cadeia de polímeros, que as mantém afastadas (Figura 2.8-(b)) (Baltazar *et al.*, 2013).

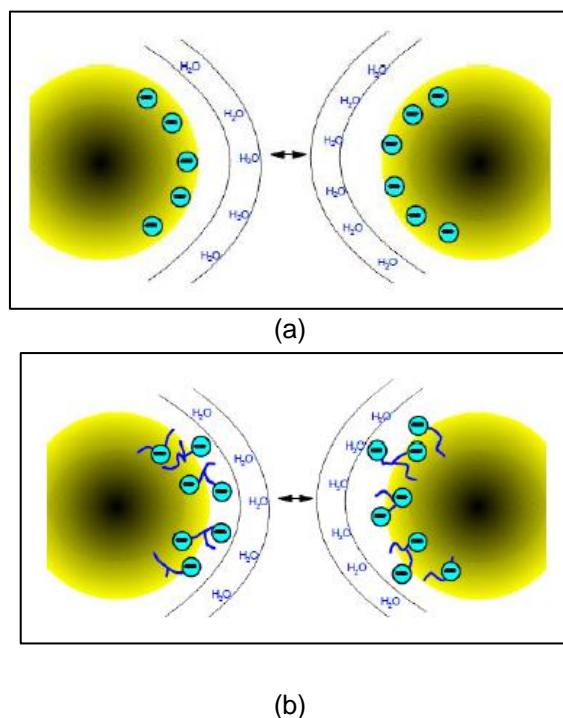


Figura 2.8 — Tipos de repulsão- (a) repulsão electrostática, (b) repulsão electro-estérica (Leaflet, 2008)

- **Rácio água/ligante**

O rácio água/ligante é um dos factores mais influentes na formulação de um *grout*, pois permite definir a viscosidade e o escoamento do *grout* para condições de injectabilidade. Quanto maior for esse factor mais fluída é a mistura (Gouveia, 2017).

Os rácios de *grouts* cimentícios para reparação e consolidação de alvenarias de pedra, estão balizados entre 0,5 a 1,0. Para se ter um termo de comparação, os *grouts* que se destinam ao recobrimento de cabos de pré-esforço, possuem rácios entre 0,35 e 0,42, enquanto os de injeção no solo ou rochas de fundação são mais fluídos, variando entre 1,0 e 2,0 (Rosquoët, 2003).

No que diz respeito ao rácio *a/l* utilizado nos *grouts* à base de NHL, este tem vindo a decrescer, devido à adição de superplastificante nos *grouts*. É usual encontrar valores de *a/l* entre os 0,7 e os 0,3. (Mendes, 2013, Cardoso, 2018, Gouveia, 2017, Cardoso, 2015).

2.3. Microtecnologia

A microtecnologia é uma tecnologia com características próximas a um micrómetro. É utilizada em todas as áreas, por melhorar desempenhos e funcionalidades, reduzir dimensões e aumentar o volume de produção.

2.3.1. Microesferas ocas de vidro

As microesferas ocas de vidro (Hollow Glass Microspheres (HGMs)), foram desenvolvidas pela empresa 3M em 1960.

Como o nome indica, as microesferas são pequenas partículas esféricas. As dimensões variam de 12 a 300 microns de diâmetro e 10 a 0,1 microns de espessura da parede. Podem ser compostos de acrilonitrila, vidro, cerâmica ou materiais fenólicos. Por serem ocas, a massa volúmica das microesferas é, em regra, menor que a de outros aditivos não solúveis.

- **Aplicações**

As microesferas de vidro são fabricadas para uma ampla variedade de usos, como em investigação científica, na medicina, em bens de consumo, sinalização, entre outras.

As microesferas de vidro são adicionadas a outros componentes, como resinas, cimento e polímeros, para aplicação em diversos segmentos. No caso dos polímeros, o uso pode reduzir o peso das peças de 10% a 20% e diminuir o tempo de produção. Actualmente é bastante útil na sinalética rodoviária devido à retroreflexão da luz automóvel (Figura 2.9), na indústria aeroespacial, mineração, petróleo, gás, tintas e vernizes.

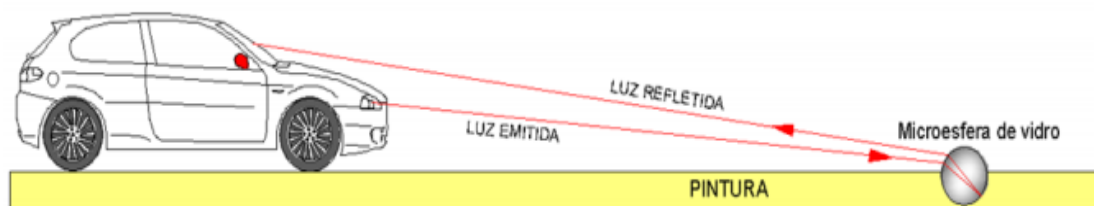


Figura 2.9 - Fenómeno de retroreflexão (adaptado de Dias, 2017)

- **Composição e fabrico**

As microesferas ocas de vidro tem por base o dióxido de silício (SiO_2), que é inicialmente produzido a altas temperaturas, após ser moído até um tamanho reduzido. As quantidades vestigiais de um composto contendo enxofre, tal como sulfato de sódio, são então misturadas com o pó de vidro. De seguida as partículas passam por um processo de transferência de calor a alta temperatura, durante o qual a viscosidade do vidro cai e a tensão superficial faz com que as partículas formem esferas perfeitas. O aquecimento contínuo activa o agente de

expansão, que libera quantidades minúsculas de gás sulfuroso, que formam bolhas dentro das gotículas de vidro fundido, originando uma esfera rígida e oca (Figura 2.10).

Microesferas de vidro também podem ser produzidas processando perlita. Tipicamente, o processo envolve um tratamento de lixiviação de ácido, usando ácido clorídrico ou sulfúrico a temperaturas de 150 °C a 200 °C, o que é seguido por um processo de tratamento térmico para o acabamento.

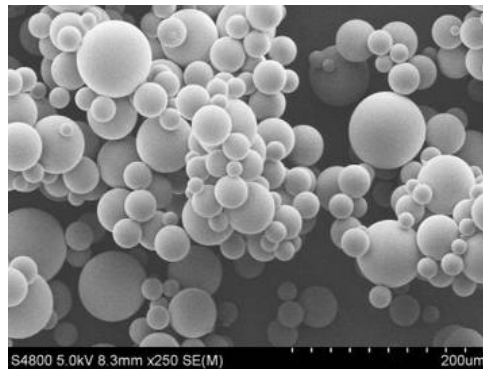


Figura 2.10 - Microesferas ocas de vidro (adaptado de Raszewski, 2008)

- **Aplicação em compósitos e injeção**

A pequena estrutura esférica da microesfera é a forma perfeita para um preenchimento. Os enchimentos minerais disponíveis para os fabricantes de compósitos são de formato irregular, e essa irregularidade resulta em uma área de superfície relativamente grande, o que aumenta a viscosidade do compósito. Por outro lado, a regularidade das microesferas minimiza sua área de superfície. *“A área de superfície baixa permite maior carregamento de sólidos com menos impacto nas características de viscosidade e fluxo do compósito”* (Rosenbusch, 2003).

Além disso, a microesfera tem uma proporção nominal de 1:1, dando-lhe propriedades inerentemente isotrópicas, que pode ser uma grande vantagem. Por exemplo, um processo de injeção de resina com fibras de vidro, resulta em 60% menos rigidez na direção do fluxo cruzado do que na direção do fluxo, pois as fibras ficam orientadas na direção do fluxo. Esse alinhamento das fibras pode contribuir para o empenamento, principalmente quando introduzidas em estruturas cristalinas, como o nylon ou o polipropileno, que possuem cadeias moleculares que tendem a alinhar-se ao longo das linhas de fluxo. As microesferas, por outro lado, não se orientam, resultando em tensões distribuídas mais uniformemente (Rosenbusch, 2003).

As microesferas podem, também, actuar como “mini rolamentos de esferas”, que permite que a resina ou, no neste caso o *grout*, a injectar se infiltre mais facilmente em geometrias complexas, como o núcleo interno de uma parede de alvenaria de panos múltiplos.

2.3.2. Fibras de polipropileno

As fibras podem classificadas mediante a sua origem, subdividindo-se em naturais (orgânicas ou inorgânicas) e sintéticas. A celulose e o bambu são exemplos de fibras naturais orgânicas, já o amianto caracteriza-se como inorgânico.

- **Fibras sintéticas**

As fibras sintéticas são produzidas através de produtos químicos, nomeadamente da indústria petroquímica. As mais conhecidas são o poliéster (PES), a poliamida (PA), o acrílico (PAC), o polipropileno (PP) e o poliuretano (PUR), além das aramidas (Kevlar e Nomex).

- **Composição e produção**

O Polipropileno, $(C_3H_6)_n$, é um polímero, mais precisamente um termoplástico, derivado do propeno. Esta fibra é produzida em monofilamentos contínuos de secção circular ou fitas fibriladas de secção transversal rectangular (Figura 2.11).



Figura 2.11 - Exemplos de fibras poliméricas (Mateus, 2013)

- **Utilização na construção**

A história da utilização de compósitos reforçados com fibras como materiais de construção data de mais de 3.000 anos. Há exemplos do uso de palhas em adobes e crina de cavalo reforçando materiais cimentícios (Evangelista, 2003).

Um material compósito resulta da combinação de dois ou mais materiais que têm propriedades que os materiais componentes isoladamente não apresentam. Na construção, os compósitos são tipicamente constituídos por uma estrutura frágil reforçada com fibra dúctil, como as argamassas e betões reforçados com fibras de polipropileno.

A influência das fibras de polipropileno relativamente ao seu comportamento quando inseridas no betão, tem sido exaustivamente abordado em outros estudos no sentido de melhorar o seu comportamento relativamente a módulos de elasticidade, resistência ao choque, fendilhação, durabilidade, fadiga, resistência ao impacto e abrasão, retracção, expansão, comportamento térmico e resistência ao fogo (Moreira, 2018).

A fibras de polipropileno têm também a grande vantagem de ser uma solução económica e de fácil aplicação, tendo por isso, vindo a ser aplicadas juntamente com outros materiais correntes da construção, como por exemplo, a aplicação em betões, betonilhas, argamassas.

Segundo o fabricante Vimaplás, a dosagem de fibras de polipropileno inicia-se a 0.6 kg/m³, mas a quantidade de fibras a adicionar varia consoante o campo de aplicação, como por exemplo em elementos estruturais, pavimentos, fachadas e esculturas, não sendo possível definir um valor único e preciso da quantidade de fibras a adicionar.

Segundo Bindiganavile (2016), a adição de fibras de polipropileno em argamassas à base de cal hidráulica mostram que é provável que haja uma dosagem de fibra óptima para reduzir o coeficiente de permeabilidade à água.

2.4. Noções de reologia

O termo reologia designa-se como a ciência que estuda o escoamento e deformação dos materiais. A reologia foi introduzida pelo Professor Eugene Cook Bingham em 1929, derivada da falta de meios para descrever o comportamento de alguns materiais que apresentavam um comportamento que não era possível ser desvendado, através das leis de Hooke e de Newton.

Relativamente à lei de Hooke, esta relaciona tensões e deformações, como se pode observar através da Equação 2.1.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

Nesta equação, σ , representa a tensão normal (Pa), E, o módulo de elasticidade ou de Young (Pa) e ε , a deformação linear longitudinal.

Hooke estabeleceu desta forma o princípio base de um corpo elástico ideal (Hookeano) – experimentando deformação elástica se sujeito a aplicação de forças externas anisotrópicas. A energia de deformação é acumulada, resultando na total reposição da forma inicial, assim que as forças exteriores cessarem a sua acção. O seu modelo mecânico é representado por uma mola (Barnes, 2000).

O reconhecimento da Reologia como ciência e a lei clássica de Newton permitiu simplificar uma formulação para descrever o comportamento reológico dos fluídos, tendo por base a Equação 2.2.

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

Nesta equação, F , representa a força de corte (kN), A , a área do plano paralelo à força F (m^2), τ a tensão de corte (Pa), μ a viscosidade (Pa.s) e $\dot{\gamma}$ a taxa de corte (s^{-1}).

- **Tensão de corte (τ)**

Quando uma força é aplicada tangente a uma dada área. A velocidade de escoamento pode ser mantida com uma força constante e controlada pela resistência interna do fluido, ou seja, pela sua viscosidade (Piotrowski, 1982), resultando na Equação 2.3.

$$\tau = \frac{Força}{Área} \text{ (Pa)} \quad (2.3)$$

- **Taxa de corte ($\dot{\gamma}$)**

Ao ser aplicada uma força idêntica à do ponto anterior, com uma intensidade suficiente para que se gere um escoamento de corte laminar entre duas placas, o fluido mover-se-á à velocidade máxima. Devido à fixação da placa inferior, também a primeira camada de fluido se mantém estática. O gradiente criado faz com que o diferencial de velocidade entre camadas adjacentes, de igual espessura, seja constante, resultando na Equação 2.4.

$$\dot{\gamma} = \frac{Velocidade}{Distância} \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad (2.4)$$

2.4.1. Parâmetros reológicos no âmbito da injeção de grouts

Para a medição das propriedades reológicas, é criado um escoamento laminar por camadas, tipo baralho de cartas. O escoamento é feito entre dois pratos circulares paralelos (o de baixo fixo e o de cima rotacional) e pode ser entendido como o deslocamento de camadas. (Figura 2.12). Um

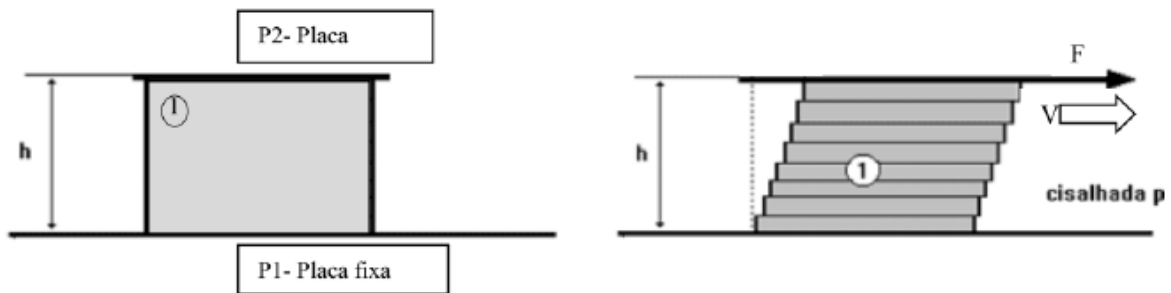


Figura 2.12 - Modelo de placas paralelas (Piotrowski, 1982)

escoamento deste tipo é realizado, por exemplo, em reômetros rotacionais (Figura 2.13).

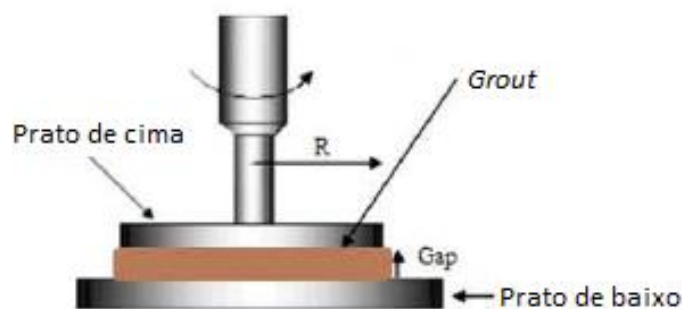


Figura 2.13 - Ilustração da geometria utilizada em reômetros rotacionais (adaptado de Baltazar, 2015)

- **Tensão de cedência**

É uma tensão limite de escoamento que representa a tensão necessária para que o fluido comece a escoar.

- **Viscosidade aparente (η)**

É uma expressão que surge da lei de Newton que mede a resistência dos corpos ao escoamento. Isso deve-se ao atrito interno entre partículas, resultando na Equação 2.5.

$$\eta = \frac{\text{Tensão de corte}}{\text{Taxa de corte}} \text{ (Pa.s)} \quad (2.5)$$

2.4.2. Tipos de fluidos

A viscosidade dos materiais é afectada por parâmetros como a temperatura, a pressão ou a taxa de corte. Nesta perspectiva é relevante compreender e diferenciar os tipos de fluidos que surgem quando afectados por estes, que se dividem em fluidos Newtonianos, não Newtonianos e transientes.

- **Newtonianos**

O fluido Newtoniano é aquele em que a viscosidade não se altera com a aplicação de uma taxa de corte nem apresenta propriedades elásticas, embora varie com a temperatura e a pressão. Exemplo de fluidos com um comportamento newtoniano: água, óleos lubrificantes, solventes, hidrogénio e oxigénio (Matos, 2013).

- **Não-Newtonianos**

Os fluidos não-Newtonianos são aqueles para os quais a viscosidade depende da taxa de corte aplicada. Isto significa que a amostra não tem uma viscosidade constante, variando com a velocidade de corte.

Os fluidos não-Newtonianos podem ser de três tipos: reofluidificantes, reoespessantes e de Bingham, dependendo da curva tensão de corte e da taxa de corte.

O fluido reofluidificante é aquele cuja viscosidade decresce com o aumento da taxa de corte. Já no fluido reoespessante verifica-se o contrário, a viscosidade aumenta com o aumento da taxa de corte. O fluido de Bingham, corresponde a um fluido que só escoar a partir de um determinado valor crítico chamado tensão de cedência.

- **Fluidos transientes**

Existem casos em que, para uma taxa de corte, a viscosidade e a tensão de corte podem aumentar ou diminuir com o tempo. Este tipo de comportamento designa-se por tixotropia, e pode ser entendida como um decréscimo da viscosidade quando o fluido é sujeito a uma tensão constante e este flui, estando previamente em repouso, e o recuperar dessa viscosidade (i.e. da estrutura inicial) quando a tensão é removida.

Pode-se observar, na seguinte Figura 2.14 os comportamentos anteriormente referidos.

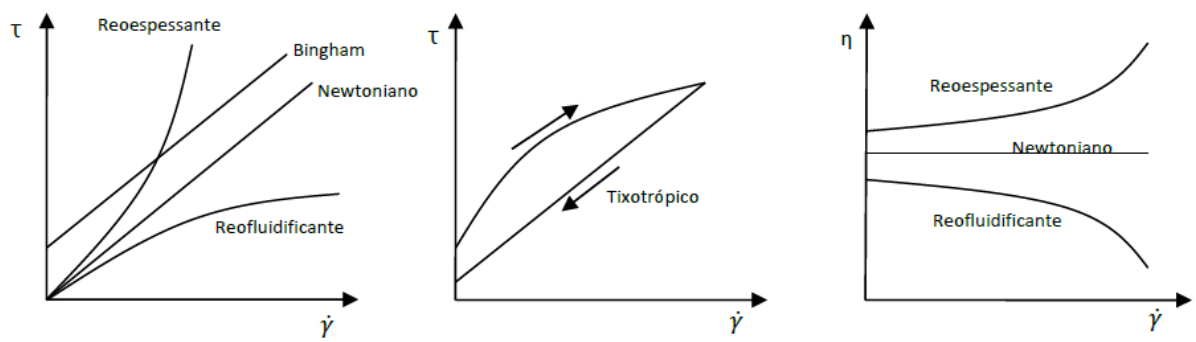


Figura 2.14 - Curvas de fluxos para diferentes tipos de fluidos (Matos,2013)

3. Métodos e procedimentos experimentais

Este capítulo expõe, de forma clara e sucinta, os métodos seguidos ao longo de toda a campanha experimental. Será feita uma descrição detalhada de todos os procedimentos experimentais, uma caracterização dos materiais e equipamentos utilizados.

A campanha experimental decorreu nos Laboratórios de Construção no Departamento de Engenharia Civil (DEC). Excluem-se os ensaios reológicos, que decorreram no laboratório de reologia do Centro de Investigação de Materiais (CENIMAT|i3N) do Departamento de Ciências dos Materiais (DCM). Ambos os departamentos pertencem à Faculdade de Ciências e Tecnologias (FCT) da Universidade Nova de Lisboa (UNL).

Os procedimentos experimentais foram divididos em duas partes distintas. A primeira incide na caracterização das amostras no estado fresco através de ensaios reológicos. A segunda parte recai sobre os ensaios realizados aos provetes dos diferentes *grouts* no estado endurecido, nomeadamente os ensaios de absorção de água por capilaridade, secagem, resistência ao ataque por cloretos, resistência mecânica, porosidade aberta, termogravimetria e massa volúmica.

Com o objectivo de avaliar o comportamento mecânico, físico e reológico da adição de microesferas de vidro (ME) e fibras de polipropileno (PP) em *grouts* de injeção, à base de cal hidráulica natural (NHL) e superplastificante (SP), realizaram-se sete misturas. Uma de referência sem qualquer tipo de adição de PP ou ME, 3 misturas variando apenas a percentagem de PP e 3 misturas variando apenas a percentagem de ME.

3.1. Planificação da campanha experimental

A campanha experimental decorreu entre novembro e abril do ano lectivo 2018/2019. Iniciou-se com os ensaios reológicos correspondentes ao estado fresco, seguindo-se os ensaios mecânicos e de durabilidade, referentes ao estado endurecido dos *grouts*. Estes foram realizados aos 60 dias de cura. Começou-se com o ensaio de absorção de água por capilaridade, seguido do ensaio de secagem e por último o ensaio de resistência ao ataque por cloretos. Os ensaios mecânicos foram realizados aos 120 dias de cura, e começaram por se realizar os ensaios de resistência mecânica, seguido do ensaio de porosidade aberta, massa volúmica e termogravimetria.

Na Figura 3.1 apresenta-se de forma esquemática a planificação da campanha experimental referente aos ensaios no estado endurecido.

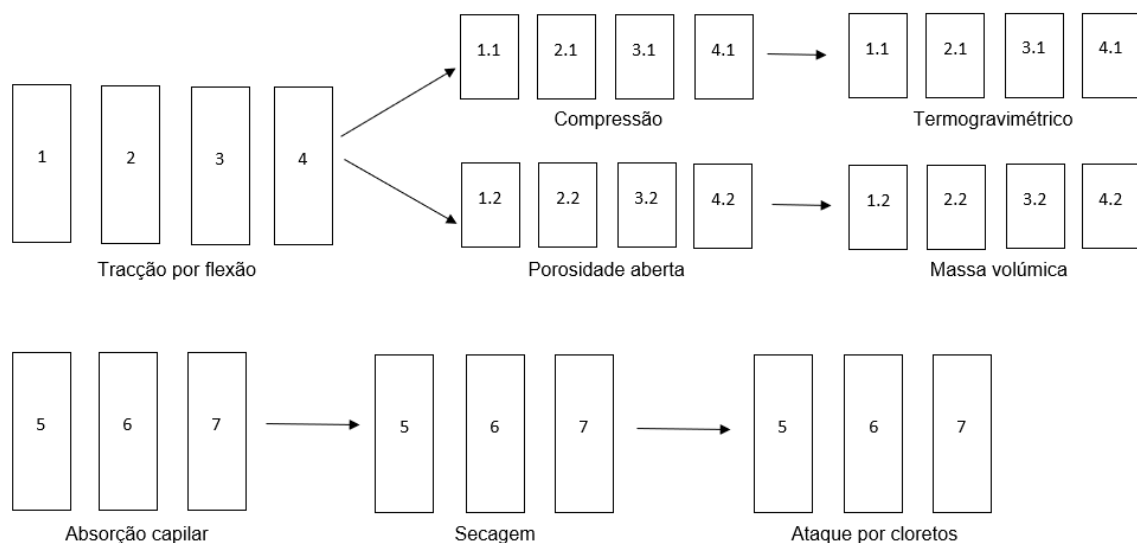


Figura 3.1 - Esquema sequencial dos ensaios no estado endurecido

3.2. Materiais

3.2.1. Cal hidráulica natural (NHL)

Na realização de todos os *grouts* analisados na presente dissertação, utilizou-se como ligante a cal hidráulica natural (NHL 5), produzida pela Secil, e que cumpre os requisitos da NP EN 459-1:2011. Na Tabela 3.1 são apresentadas as características exigidas pela Norma, de acordo com as informações fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.1 - Características da cal hidráulica natural da Secil (NHL 5) (Sequeira, 2007)

Características		Valores
Químicas	Cal disponível $C_a(OH)_2$	$\geq 15\%$
	Sulfato	$\leq 2\%$
Resistências mecânicas	Compressão 7 dias	≥ 2 MPa
	Compressão 28 dias	≥ 5 MPa e ≤ 15 MPa
Físicas	Cor	Beje
	Densidade	2.7 g/cm^3
	Baridade	$0.65 \pm 0.05 \text{ Kg/dm}^3$
	Finura (%)	900
		200
	Água livre	$\leq 2\%$
	Expansibilidade	$\leq 2 \text{ mm}$
	Penetração	$\leq 30 \text{ mm}$
	Teor água	$\leq 4\%$
	Tempo de presa	Início
		Fim
	Superfície Específica	$9400 \text{ cm}^2/\text{g}$

3.2.2. Superplastificante (SP)

O superplastificante utilizado foi o ViscoCrete-225 produzido pela Sika. Este SP tem por base o policarboxilato em pó, o que altera ligeiramente o processo de mistura desenvolvido no âmbito de outros trabalhos com *grouts* de injeção (Cardoso, 2018), sendo introduzido na fase seca da mistura. Na Tabela 3.2 são apresentadas as características de acordo com o fabricante.

Tabela 3.2 – Características do superplastificante de acordo com o fabricante

Características	Valores
Cor	Branco natural
Consistência	Pó
Massa volúmica	0.1 g/cm ³
Dosagem	0.05% - 0.5%

3.2.3. Microesferas ocas de vidro (ME)

As microesferas ocas de vidro têm por base o dióxido de silício, (SiO₂). Estas apresentam maioritariamente uma forma esférica de dimensões muitas reduzidas, confundindo-se com um pó (Figura 3.2). Na Tabela 3.3 apresentam-se as características de acordo com o fabricante.

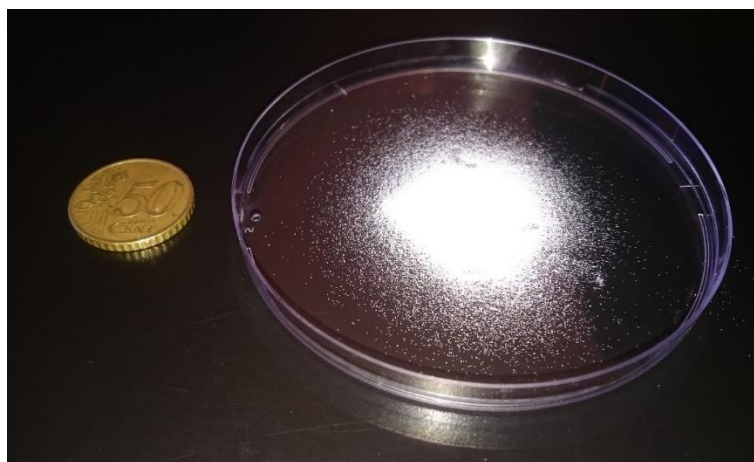


Figura 3.2 – Microesferas ocas de vidro

Tabela 3.3 - Características das microesferas ocas de vidro de acordo com o fabricante

Características	Valores
Cor	Branco natural
Forma	Esférica
Massa volúmica	2.5 ± 0.1 g/cm ³
Dimensões	50 a 106 microns

De forma a evidenciar as dimensões e características deste material, procedeu-se à visualização através do microscópio (OLYMPUS – SZH10) (Figura 3.3) e à peneiração através do agitador mecânico (Figura 3.4) e consequente realização da curva granulométrica (Tabela 3.4 e Figura 3.5).



Figura 3.3 - Microscópio (OLYMPUS - SZH10)



Figura 3.4 - Agitador mecânico - Ensaio de peneiração

Tabela 3.4 - Dados curva granulométrica das microesferas ocas de vidro

Peneiro ASTM	Abertura da malha (mm)	Massa retida (g)	Massa passada (g)	Retido acumulado (%)	Passado acumulado (%)
Nº.100	0,15	0	10	0,0	100,0
Nº.120	0,125	0	10	0,0	100,0
Nº.140	0,106	0,074	9,926	0,7	99,3
Nº.170	0,09	0,155	9,771	1,5	97,7
Nº.200	0,075	0,663	9,108	6,6	91,1
Nº.230	0,063	4,333	4,775	43,3	47,7
Nº.270	0,053	4,11	0,665	41,1	6,6
Nº.325	0,045	0,603	0,062	6,0	0,6
Nº.400	0,038	0,031	0,031	0,3	0,3
Refugo	-	0,031	0	0,3	0,0

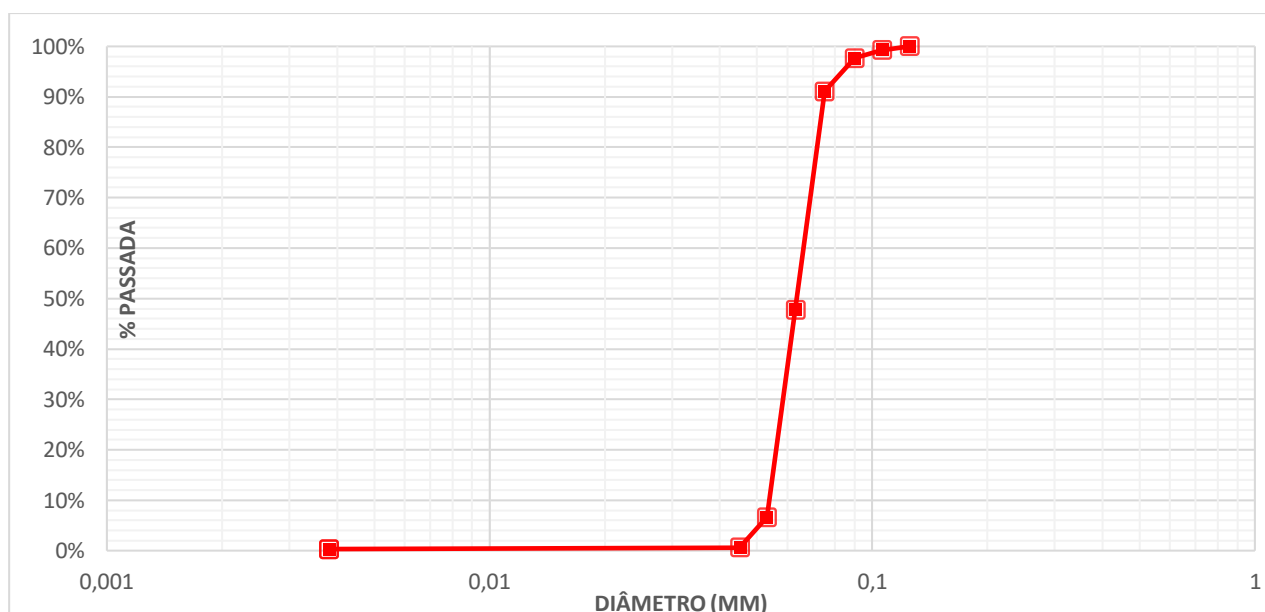


Figura 3.5 - Curva granulométrica das microesferas ocas de vidro

Pode-se observar que a dimensão da grande parte das microesferas (aproximadamente 84%) varia entre os 53 e os 63 microns, apresentando-se entre o intervalo de dimensões fornecidas pelo fabricante e que as restantes partículas (aproximadamente 16%) variam entre os 38 e os 106 microns.

Nas imagens recolhidas através do microscópio, percebeu-se que existiam partículas que apresentavam algumas anomalias (Figura 3.6), nomeadamente, não apresentavam a forma esférica pretendida.

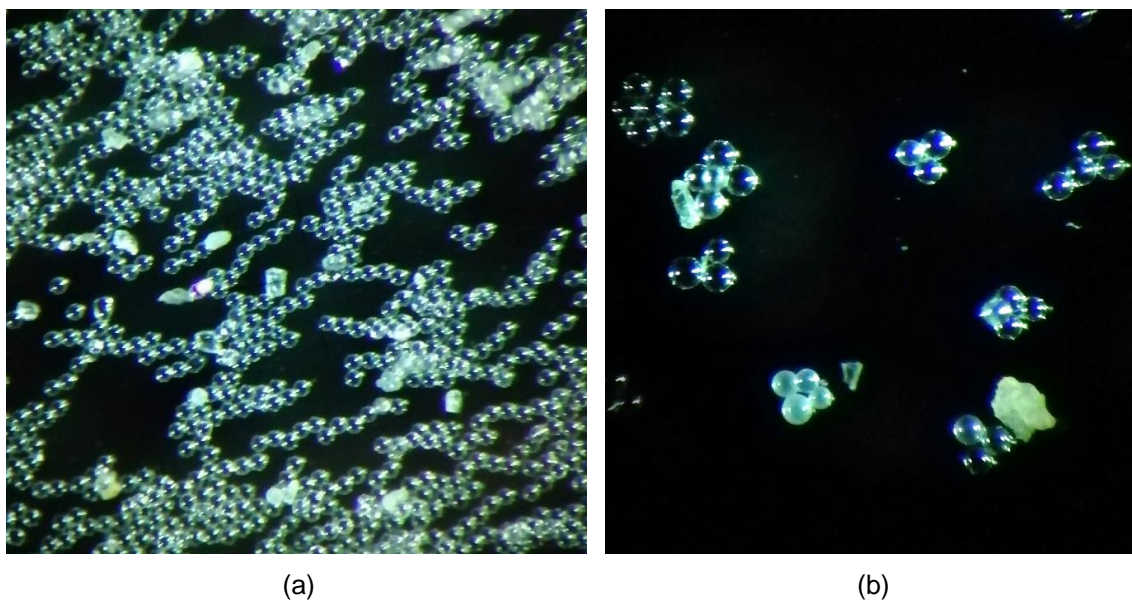


Figura 3.6 - Anomalias verificadas nas microesferas ocas de vidro – a) zoom ratio 6, b) zoom ratio 4

As anomalias visualizadas são um factor prejudicial para os grouts, pois as irregularidades esféricas resultam numa área de superfície maior, o que leva ao aumento da viscosidade dos *grouts*.

3.2.4. Fibras de polipropileno (PP)

A fibras de polipropileno utilizadas nos *grouts* foram as VimaFiber 512, que são fibras cortadas em polipropileno multifilamento, fabricadas pela Vimaplás. Na Tabela 3.4 são apresentadas as características de acordo com o fabricante. Importa referir que as fibras foram desagregadas manualmente antes de serem inseridas na mistura (Figura 3.7 e 3.8).



Figura 3.7 - Fibras de polipropileno agregadas (1,5 gramas)



Figura 3.8 - Fibras de polipropileno desagregadas (1,5 gramas)

Tabela 3.5 - Características das fibras de polipropileno de acordo com o fabricante

Características	Valores
Matéria prima	Polipropileno (C ₃ H ₆)
Diâmetro médio da fibra	31 µm (aprox.)
Comprimento da fibra	12 mm (aprox.)
Densidade	910 Kg/m ³
Absorção de humidade	Nula
Cor	Transparente / Branco natural

3.3. Procedimento de amassadura

3.3.1. Composição dos *grouts*

No âmbito das experiências e trabalhos desenvolvidos anteriormente por (Cardoso (2018), Gouveia (2017), Gomes (2016), Cardoso (2015), Guerreiro (2014) e Matos (2013)), foram formuladas diferentes composições de *grouts* sujeitas a alterações na adição de fibras de polipropileno (PP) e de microesferas ocas de vidro (ME). Em todos os *grouts* as quantidades de cal hidráulica natural (NHL) e de superplastificante (SP) não se alteraram, bem como a relação água/ligante (a/l). Na Tabela 3.6 apresentam-se as formulações utilizadas para cada *grout* em valores percentuais e quantitativos, respectivamente.

Os provetes foram identificados de forma simples, identificando o *grout* de referência com a designação “Ref.”, os *grouts* com fibras de PP (PP_0.1, PP_0.25 e PP_0.5), por ordem crescente de percentagem de PP, 0,1%, 0,25% e 0,5%, respectivamente, e os *grouts* com ME (ME_5.0, ME_10 e ME_20), por ordem crescente de percentagem de ME, 5%, 10% e 20%, respectivamente.

Tabela 3.6 - Formulações dos *grouts* indicadas em percentagens mássicas e em massa

Grouts	NHL	ME		PP		a/l		SP	
	g	%	g	%	g	%	g	%	g
Ref.	300	-	-	-	-	0,5	150	0,2	0,6
PP_0.1	300	-	-	0,1	0,3	0,5	150	0,2	0,6
PP_0.25	300	-	-	0,25	0,75	0,5	150	0,2	0,6
PP_0.5	300	-	-	0,5	1,5	0,5	150	0,2	0,6
ME_5.0	300	5	15	-	-	0,5	150	0,2	0,6
ME_10	300	10	30	-	-	0,5	150	0,2	0,6
ME_20	300	20	60	-	-	0,5	150	0,2	0,6

3.3.2. Execução dos *grouts*

Todos os *grouts* passaram por um processo de amassadura semelhante, garantindo que não se introduziam mais variáveis no estudo, como o tempo de mistura, a temperatura e humidade do ambiente e os equipamentos utilizados neste processo, entre outras, pois são variáveis que alteram as propriedades físicas das misturas.

Primeiramente foi pesada num tabuleiro metálico e num recipiente, as quantidades de NHL e água necessárias à realização do *grout*, utilizando a balança de menor precisão, que ainda assim, permite pesagens até ao decígrama. De seguida foram feitas as pesagens do superplastificante, das microesferas e das fibras de polipropileno utilizando a balança de maior precisão, que nos permite uma precisão na pesagem até aos miligramas. Depois de realizadas todas as pesagens foi feita a mistura seca dentro do tabuleiro metálico (Figura 3.9), com auxílio de uma colher de pedreiro. A mistura seca contém apenas a NHL, o superplastificante e a quantidade pretendida de ME ou PP. Depois de humedecer previamente a haste e o balde da misturadora, colocou-se a mistura seca no balde, juntou-se a água e procedeu-se à amassadura com o auxílio de uma espátula e da misturadora, o tempo de mistura foi de três minutos.



Figura 3.9 – Adição das fibras de polipropileno

3.3.3. Construção dos moldes dos provetes

Os moldes para os provetes prismáticos foram feitos utilizando contraplacado de madeira impermeável e com dimensões 20x20x80 (mm³), foram previamente montados e preenchidos nas suas juntas com silicone, para prevenir alguma fuga do *grout*. Antes de ser colocado o *grout* nos moldes, estes foram pincelados com óleo descofrante em todas as faces, com o objectivo de facilitar a desmoldagem dos provetes após a cura. À medida que os *grouts* terminavam o processo de mistura, eram imediatamente colocados nos moldes, (Figura 3.10) de forma a evitar qualquer erro que decorresse da perda de homogeneidade do *grout*.

É de salientar que os provetes de ensaio foram definidos com metade das dimensões em relação aos de dimensões standard (40x40x160 mm³), por motivos de rentabilização da quantidade de microesferas ocas de vidro.



Figura 3.10 - Colocação do *grout* no molde

3.3.4. Condições de cura

Após a colocação de todos os *grouts* nos moldes, os moldes foram deslocados para uma sala condicionada no Departamento de Engenharia Civil (DEC) da FCT-UNL, onde foram submetidos a condições de temperatura e humidade relativa controladas durante todo o período de cura. Após três dias procedeu-se à desmoldagem dos provetes (Figura 3.11), e posteriormente continuaram na sala condicionada. A temperatura de cura foi predefinida a 20 ± 2 °C e a humidade relativa (HR) de $65 \pm 5\%$.



Figura 3.11 - Provetes após a desmoldagem

3.4. Ensaios reológicos

O ensaio realizado no estado fresco é de elevada importância, pois permite saber a fluidez dos *grouts*, que é um factor muito importante no que diz respeito à sua aplicação por injeção.

Para analisar esse comportamento, é necessário caracterizar as propriedades reológicas dos *grouts*, como a viscosidade e a tensão de cedência. O ensaio que permite obter essas propriedades com elevada precisão é o ensaio reológico. Como tal, recorreu-se a um reómetro, localizado no CENIMAT|3N, que está associado a um computador equipado com um *software* que permite controlar o equipamento e analisar os resultados experimentais.

As medições reológicas foram realizadas com recurso ao reómetro rotacional, *Gemini HRnano* da *Bohlin Instruments* (Figura 3.12) .



Figura 3.12 - Reómetro rotacional (*Gemini HRnano* da *Bohlin Instruments*)

Primeiro foram elaborados *grouts* específicos para este ensaio no DEC, seguindo o método de amassadura descrito anteriormente, tendo as medições reológicas decorrido no laboratório de reologia do CENIMAT|3N, com 5 ± 1 minutos de desfasamento relativamente à fase final do processo de amassadura. As medições reológicas foram realizadas com uma geometria de pratos planos com 40 mm de diâmetro e um gap (afastamento entre pratos) de 2 mm. A temperatura adoptada foi de 20°C e mantida pelo peltier. Aquando de cada medição os *grouts* foram sujeitos a uma pré-carga com o objectivo de homogeneizar a amostra, utilizando uma taxa de corte de 0.5 s^{-1} durante 60s seguido

de um período de repouso de 60s e definiu-se, também, a gama de taxas de corte a aplicar na caracterização reológica dos *grouts*, aplicando uma variação crescente da taxa de corte entre os 1 e os 300 s^{-1} e reduzindo inversamente dos 300 ao 1 s^{-1} , tendo todo o ensaio uma duração de aproximadamente 10 minutos.

A interpretação do comportamento de suspensões durante o escoamento é baseada em modelos matemáticos que permitem descrever o escoamento.

Não existindo um modelo previamente estabelecido para analisar este tipo de materiais e recorrendo à análise bibliográfica, os modelos de Bingham, o modelo de Herschel & Bulkley e o modelo de Power Law, pela sua simplicidade, são por isso utilizados com maior frequência em estudos de *grouts* para consolidação de alvenarias (Gouveia, 2017).

O Modelo de Bingham permite o ajuste a curvas de escoamento que, durante o escoamento e após ser excedida a tensão de cedência, não apresentem um desenvolvimento exactamente linear.

O Modelo de Herschel & Bulkley descreve o comportamento de materiais reofluidificantes e reosspessantes.

O Modelo de Power Law complementa o modelo de Bingham, pois sozinho não é suficiente para caracterizar toda a gama de taxas de corte.

3.5. Ensaios realizados no estado endurecido

Os ensaios iniciaram-se aos 60 dias de cura, e foram realizados entre janeiro e abril de 2019, sendo eles:

- Resistência à tracção por flexão;
- Resistência à compressão;
- Resistência ao ataque por cloretos;
- Absorção de água por capilaridade ;
- Secagem;
- Porosidade aberta e massa volúmica;
- Termogravimetria.

3.5.1. Resistência à tracção por flexão

O ensaio foi realizado com recurso a uma prensa hidráulica, MATEST, modelo E-183, equipado com unidade de controle "Servotronic" (Figura 3.13) para fornecer testes automáticos em todas as fases, com uma célula de carga de 15 kN e foi executado com base na EN 1015-11:1999a (CEN, 1999). O ensaio consiste na aplicação de uma carga, com igual afastamento entre os apoios, onde a face superior é comprimida e a inferior traccionada. Quando se atingiu a carga última na zona traccionada, ocorre a ruptura do provete, de onde resultam duas metades aproximadas.



Figura 3.13 - Prensa hidráulica MATEST - E183 e controle "SERVOTRONIC"

O provete, com dimensões de 20x20x80 mm, foi colocado horizontalmente entre os dois apoios, espaçados de 6 cm. O carregamento aumentou de forma constante, à taxa de 0,2 mm/min até ocorrer a ruptura. O *software* regista um gráfico força-deslocamento de onde é retirado o valor associado à ruptura do provete. Pela análise do referido gráfico, a carga última de ruptura é aquela que corresponde a um pico e a que está adjacente uma descida brusca, no que diz respeito aos valores de força imposta. Na Figura 3.14 observa-se a realização deste ensaio.



Figura 3.14 - Ensaio de resistência à flexão por tracção

O ensaio de resistência à tracção por flexão (R_t) permite determinar a resistência à fendilhação. O valor de R_t é calculado através das Equações 3.1 a 3.4:

$$R_t = \frac{\frac{M \times d}{2}}{I} \quad (\text{MPa}) \quad (3.1)$$

onde: M – momento produzido pela carga aplicada (N.mm); I – inércia do provete (mm^4); d – altura do provete (mm).

Devido à secção do provete ser quadrada, considera-se um modelo simplesmente apoiado, dando origem à Equação 3.2, que traduz o cálculo do momento formado pela carga aplicada em função da inércia do provete:

$$M = \frac{F_t \times l}{4} \quad (\text{N/mm}) \quad (3.2)$$

onde: F_t – força última aplicada a meio vão (N); l – distância entre apoios (mm).

O momento de inércia de uma secção quadrada é dado pela Equação 3.3:

$$I = \frac{b \times d^3}{12} \quad (\text{mm}^4) \quad (3.3)$$

onde: b – Largura do provete (mm); d – Altura do provete (mm)

Simplificando as expressões anteriormente descritas, a resistência à tracção por flexão pode ser calcula através da Equação 3.4:

$$R_t = \frac{3 \times F_t \times l}{2 \times b \times d^2} \quad (\text{MPa}) \quad (3.4)$$

Onde: F_t – Carga da última tracção por flexão (N); l – Distância entre apoios (mm); b – Largura do provete (mm); d – Altura do provete (mm).

3.5.2. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado com quatro metades aproximadas (de cada mistura) de provetes, provenientes do ensaio de resistência à flexão por tracção, seguindo a EN 1015-11:1999 (CEN, 1999). O equipamento utilizado foi o mesmo do ensaio de resistência à flexão por tracção.

Foram colocadas as metades entre dois acessórios metálicos totalmente lisos, com 40 mm de largura, e este conjunto foi colocado entre os pratos da prensa (Figura 3.15). A máquina é accionada, aumentando a força aplicada de forma constante, a uma taxa de 0,7 mm/min, sendo os valores registados no controlador. Este registo dá-se através da produção de um gráfico força/deslocamento no qual os valores de força aplicada vão aumentando até à rotura do provete que após este fenómeno desce bruscamente. O pico de força registado no gráfico representa a força máxima para a qual o provete teve capacidade de resistir. Através deste valor é possível obter a resistência à compressão de cada provete, dividindo-o pela área de contacto entre o acessório e o provete, através da Equação 3.5:

$$\sigma = \frac{F}{A_p} \text{ (MPa)} \quad (3.5)$$

onde: F – Força de aplicação (N); A_p – Área de aplicação (mm²).



Figura 3.15 - Ensaio de resistência à compressão

3.5.3. Resistência ao ataque por cloretos

Este ensaio foi realizado com base na EN 12370:1999 (CEN, 1999). Apesar de na norma estar preconizado o uso de uma solução de sulfato de sódio decahidratado, foi utilizada uma solução de cloreto de sódio.

Foram utilizados os provetes provenientes do ensaio de secagem, como tal, foi necessário remover o papel celofane e elásticos que envolviam os provetes, seguindo-se a sua secagem em estufa à temperatura de $60 \pm 5^\circ\text{C}$. A prévia secagem em estufa, durante 12 horas, é fundamental neste ensaio, que consiste em submeter os provetes a ciclos sucessivos de imersão e de secagem, avaliando a evolução das suas massas e qualificando a degradação apresentada.

Inicialmente, foi preparada a solução de cloreto de sódio dentro de uma caixa estanque com uma concentração de 6,17%, equivalente à concentração de 14% de sulfato de sódio prescrita na norma (Faria, 2004).

Depois de os provetes saírem da estufa, foi feita a pesagem e o seu registo fotográfico. De seguida, estes foram imersos na solução de cloreto de sódio durante 2 horas, correspondendo esta fase ao ciclo imerso do ensaio (Figura 3.16). A caixa foi mantida fechada para impedir a evaporação de água, e os provetes colocados a 2 cm entre eles, no mínimo, e a 2 cm das paredes da caixa para terem condições de absorção semelhantes. Passadas as 2 horas, e terminado o primeiro ciclo de imersão, iniciou-se o ciclo de secagem, transferindo os provetes da imersão para uma estufa a $100 \pm 5^\circ\text{C}$, onde ficou durante 12 horas. Finda esta fase, os provetes foram retirados da estufa e deixados em repouso durante 2 horas e, de seguida, seguindo-se as pesagens e os registos fotográficos. O procedimento repetiu-se até se atingirem 15 ciclos.



Figura 3.16 - Imersão dos provetes na solução de cloreto de sódio

Avaliou-se a resistência aos cloretos, através de um parâmetro estabelecido por Duran *et al.* (2014), que classifica a resistência dos provetes após os ciclos de exposição aos cloretos, medida qualitativamente e visualmente através de uma escala de degradação enunciada de seguida.

Grau 1 – Provetes com ligeiro grau de degradação (fissuras pouco profundas);

Grau 2 – Provetes com ligeiro grau de degradação(fissuras profundas) ;

Grau 3 – Provetes com fissuras profundas e volume alterado;

Grau 4 – Provetes com geometria alterada, com fendas e perda parcial de material;

Grau 5 – Provetes bastante destruídos com perdas notórias de material.

Por fim, analisou-se a variação de massa dos provetes, recorrendo-se à Equação 3.6.

$$\Delta MV = \frac{M_i - M_0}{M_0} \times 100 (\%) \quad (3.6)$$

Onde: ΔVM – variação de massa (%); M_i – massa do provete no ciclo i (g); M_0 – massa inicial do provete (g).

3.5.4. Absorção de água por capilaridade

Neste ensaio foram utilizados três provetes inteiros referentes a cada *grout* e foi seguida a EN 1015-18:2002 (CEN, 2002).

Previamente ao ensaio, os provetes foram colocados numa estufa a $60 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 12 horas para garantir a completa secagem aquando do início do ensaio e foi feita a medição da secção (S) da base dos provetes que irá contactar com a água. Em seguida, foram impermeabilizados e pesados com papel celofane recorrendo-se à melhor fixação possível do papel, utilizando elásticos de escritório (Figura 3.17). A impermeabilização serve para que a ascensão da água seja unidireccional, ficando apenas por impermeabilizar a face que irá estar em contacto com a água e a sua face oposta.



Figura 3.17 - Impermeabilização dos provetes

O ensaio decorreu em sala condicionada com temperatura de $20 \pm 3^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $65 \pm 5\%$. Foi preparada uma caixa estanque com o ambiente húmido destinada a alojar o tabuleiro onde foram colocados os provetes (Figura 3.18). O tabuleiro onde decorreu o ensaio foi previamente nivelado através de dois suportes. Continha uma lâmina de água com 2 mm e uma rede de borracha para permitir a entrada de água através da base. Durante o decorrer do tempo de ensaio, os provetes estão em contacto permanente com a lâmina de água, sendo esta verificada ao longo do ensaio com o auxílio de uma régua.



Figura 3.18 - Ensaio de capilaridade

O ensaio foi iniciado com a medição da massa seca dos provetes já impermeabilizados (M_0), e seguiu-se um planeamento previamente executado, em que os provetes foram divididos em 2 grupos, de forma a garantir que as pesagens da sua massa (M_i) não ocorriam em simultâneo. Foram medidas as massas (M_i) em contacto com água na base aos 5, 10, 15, 30 minutos e 1 hora. A partir daí, foram medidas as massas de hora a hora durante 7 horas e depois apenas de 24 em 24 horas, até que a variação de massa entre pesagens consecutivas fosse inferior a 2%, o que se verificou apenas ao fim de 5 dias de ensaio.

É de salientar que a representatividade do ensaio foi mantida, dado que os 2 grupos continham provetes de todos os *grouts*.

Em relação ao processo de pesagem, foi feito de forma rápida, para não permitir a evaporação de água visto que os níveis de humidade no exterior da caixa são inferiores. A caixa foi mantida fechada nos movimentos de provetes para a balança; teve-se especial cuidado à queda de gotículas sobre outros provetes e foram retiradas as gotículas que vinham agarradas aos provetes com um pano húmido.

Sabendo já as pesagens (M_i), e a massa seca (M_0), determina-se a capacidade de absorção de cada provete segundo a Equação 3.7.

$$M = \frac{M_i - M_0}{S} \text{ (Kg/m}^2\text{)} \quad (3.7)$$

Em que: M_i – massa do provete no instante i (Kg); M_0 – massa do provete no instante inicial (Kg); S – área da secção do provete em contacto com a água (m^2).

Após a determinação da quantidade de água absorvida por cada um dos provetes é possível determinar o coeficiente de absorção de água por capilaridade para cada *grout*. Pode-se obter facilmente o coeficiente de absorção de água por capilaridade, através do declive da recta inicial (primeiras horas de ensaio) de um gráfico que relaciona a absorção capilar ao longo do tempo.

3.5.5. Secagem

O ensaio de secagem iniciou-se imediatamente, após finalizado o ensaio de absorção de água por capilaridade, seguindo a EN 16322:2013 (CEN, 2013). Este ensaio teve lugar na sala condicionada do DEC, a uma temperatura de $20 \pm 3^\circ\text{C}$ e humidade relativa de $65 \pm 5\%$.

O ensaio tem como objectivo avaliar do comportamento dos *grouts* à quantidade de água evaporada ao longo do tempo. O ensaio procede-se imediatamente após o ensaio de absorção de água por capilaridade, sendo a última pesagem do ensaio de capilaridade correspondente à massa inicial (M_0) do ensaio de secagem.

Começou-se pela preparação o ensaio, isolando a base que esteve em contacto com a lâmina de água no ensaio de absorção de água por capilaridade, utilizando papel celofane e elásticos, garantindo que o fluxo de evaporação seja unidireccional.

Posteriormente ocorreram as medições, no primeiro dia de hora a hora, durante as primeiras seis horas e depois uma vez por dia nos restantes dias. O ensaio considera-se terminado quando a diferença de massa entre pesagens consecutivas, intervaladas de 24h, é inferior a 0,01% da massa do provete.

No final do ensaio elaborou-se a curva de secagem, relacionado a massa de água retida (kg/m^2) em função do tempo (horas), através da Equação 3.8.

$$1,0 \geq \frac{M_0 - M_{i-1}}{M_0 - M_i} \geq 0,9 \quad (3.8)$$

A massa de água retida foi obtida através da Equação 3.9.

$$M = \frac{M_0 - M_i}{S} \quad (\text{Kg/m}^2) \quad (3.9)$$

Em que: M_0 – massa do provete no instante inicial (Kg); M_i - massa do provete no instante i (Kg); S – área de evaporação do provete (m^2).

Seguiu-se a análise do comportamento dos *grouts* no processo de secagem, onde é calculada a taxa de secagem (TS), correspondente ao declive inicial da curva de secagem em abcissas (primeiras 24 horas - período de maior relevância), que traduz a velocidade de secagem inicial de cada provete.

3.5.6. Porosidade aberta e massa volúmica

O comportamento e durabilidade dos *grouts* é condicionado pela sua porosidade aberta pois os seus resultados têm influência sobre a capacidade de absorção de água, bem como sobre a susceptibilidade às resistências mecânicas e degradações (Jorne, *et al.*,2012).

O ensaio, afim de determinar a massa volúmica e porosidade aberta, foi realizado após 150 dias de cura dos provetes e seguiu a EN 1936:2006 (CEN, 2006). Este foi organizado temporalmente em três fases distintas, executando três pesagens em cada provete, determinando a massa seca (M_1), a massa hidrostática (M_2) e a massa saturada (M_3).

Primeiramente colocou-se os provetes provenientes do ensaio de resistência à flexão por tracção numa estufa a $60 \pm 5^\circ\text{C}$, durante o período de 24 horas. Finda esta fase, foi realizada a pesagem da massa seca (M_1).

De seguida transferiu-se os provetes para o interior de um exsicador (Figura 3.19), encontrando-se uma das válvulas aberta e ligada a uma bomba visando diminuir a pressão no interior da câmara, enquanto a outra válvula fechada permitirá a introdução de água para o interior da câmara, após 24 horas (Figura 3.20).

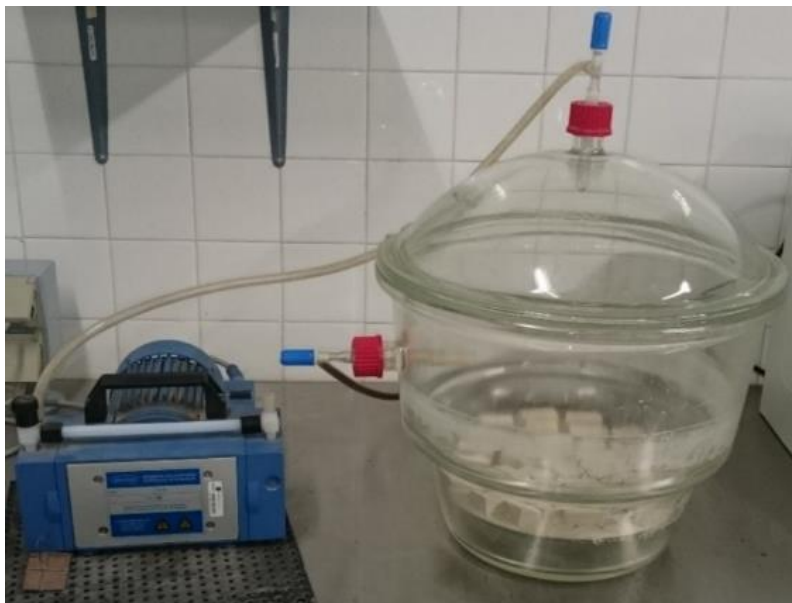


Figura 3.19 - Colocação dos provetes no interior do exsicador



Figura 3.20 - Introdução de água no interior do exsicador

Os provetes ficam nestas condições por novas 24 horas. Findas essas 24 horas, desliga-se a bomba e abre-se a câmara, expondo os provetes às condições atmosféricas, mantendo os provetes submersos durante 24 horas.

Por fim, realizaram-se as pesagens de massa hidrostática (M_2) com o auxílio de um cesto suspenso imerso em água e de massa saturada (M_3) (Figura 3.21).



Figura 3.21 - Pesagens de massas hidrostáticas e saturadas

A porosidade aberta é possível de determinar devido à remoção do ar nos poros, submetendo os provetes à fase inicial do ensaio. Como os poros dos provetes são de seguida preenchidos com água, determina-se a porosidade aberta através das pesagens segundo a Equação 3.10 e a massa volúmica segundo a Equação 3.11.

$$Porosidade\ aberta = \frac{M_3 - M_1}{M_3 - M_2} \times 100\ (%) \quad (3.10)$$

$$Massa\ volúmica = \frac{M_1}{M_3 - M_2} \text{ (Kg/m}^3\text{)} \quad (3.11)$$

3.5.7. Termogravimetria

O ensaio de termogravimetria submete amostras de *grout* a sucessivos aumentos de temperatura desencadeando reacções químicas e perda de massa nas amostras.

Neste ensaio, pretendeu-se avaliar o efeito das fibras de polipropileno e das micro esferas de vidro no processo de hidratação dos *grouts*, através da termogravimetria (TG) utilizando o equipamento termogravimétrico NETZSCH 449 F3 Júpiter (Figura 3.22).



Figura 3.22 - Equipamento termogravimétrico (NETZSCH 449 F3 Júpiter)

O primeiro processo antes de iniciar o equipamento, passou por retirar as amostras do núcleo dos provetes, imediatamente antes do ensaio, para evitar reacções de carbonatação em exposição com o ambiente. As amostras foram moídas com recurso a um almofariz e peneiradas num peneiro com malha 150 μm . Foram introduzidas 20 mg, em média, de amostra dentro de um cadinho de alumina no interior do forno do equipamento. O forno vai estar preenchido com uma atmosfera dinâmica de gás inerte N_2 (40 ml/min) e a temperatura vai aumentando a uma taxa de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ entre os 26 e o 1000°C . Após esse período, decorre o arrefecimento lento do forno (120 min) e só depois é colocado em contacto com o ambiente exterior.

Finda a participação do equipamento, foram analisados os resultados apresentados graficamente por um software num computador ligado ao equipamento. Primeiramente é fornecida a parte termogravimétrica (perda de massa em %), a partir da qual é feita a sua 1ª derivada, ou derivada termogravimétrica (DTG). A quantificação do hidróxido de cálcio foi estimada medindo a perda de massa na curva termogravimétrica pela diferença entre a temperatura inicial e a temperatura final do pico de DTG correspondente.

4. Apresentação e discussão de resultados

4.1. Medições reológicas

Todos os *grouts* analisados apresentaram um comportamento reofluidificante, ou seja, uma diminuição da viscosidade do fluido quando existe um aumento da taxa de corte. Pode-se visualizar este comportamento através da Figura 4.1 e retirar algumas notas iniciais.

Importa referir que, para uma fácil interpretação, os pontos dos gráficos realizados correspondem a valores experimentais e as linhas correspondem aos modelos utilizados.

Como se pode observar, os *grouts* que contêm micro esferas de vidro apresentam maior viscosidades aparentes do que as que contêm fibras de polipropileno. Tal não era esperado pois, empiricamente, as formulações com PP apresentavam reduzida fluidez e uma maior floculação dos constituintes, consequência das PP.

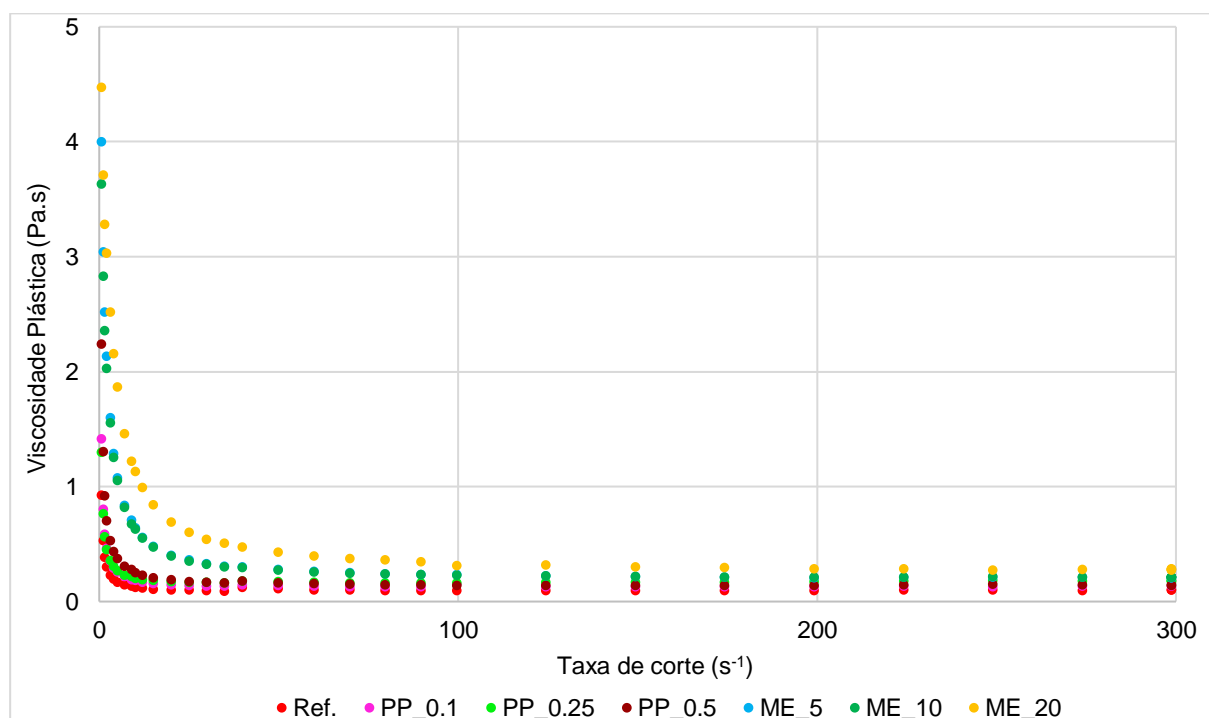


Figura 4.1 – Comportamento reofluidificante referente a cada *grout* – Valores experimentais

Através de modelos reológicos e das curvas de fluxo ilustradas na Figura 4.2, foi possível obter vários parâmetros reológicos, como a tensão de cedência, o coeficiente de viscosidade plástica e consistência. Foram adoptados os modelos matemáticos de Bingham e Herschel-Bulkley, pois apresentam um bom ajustamento às curvas de fluxo, ajustamento esse evidenciado na Figura 4.3.

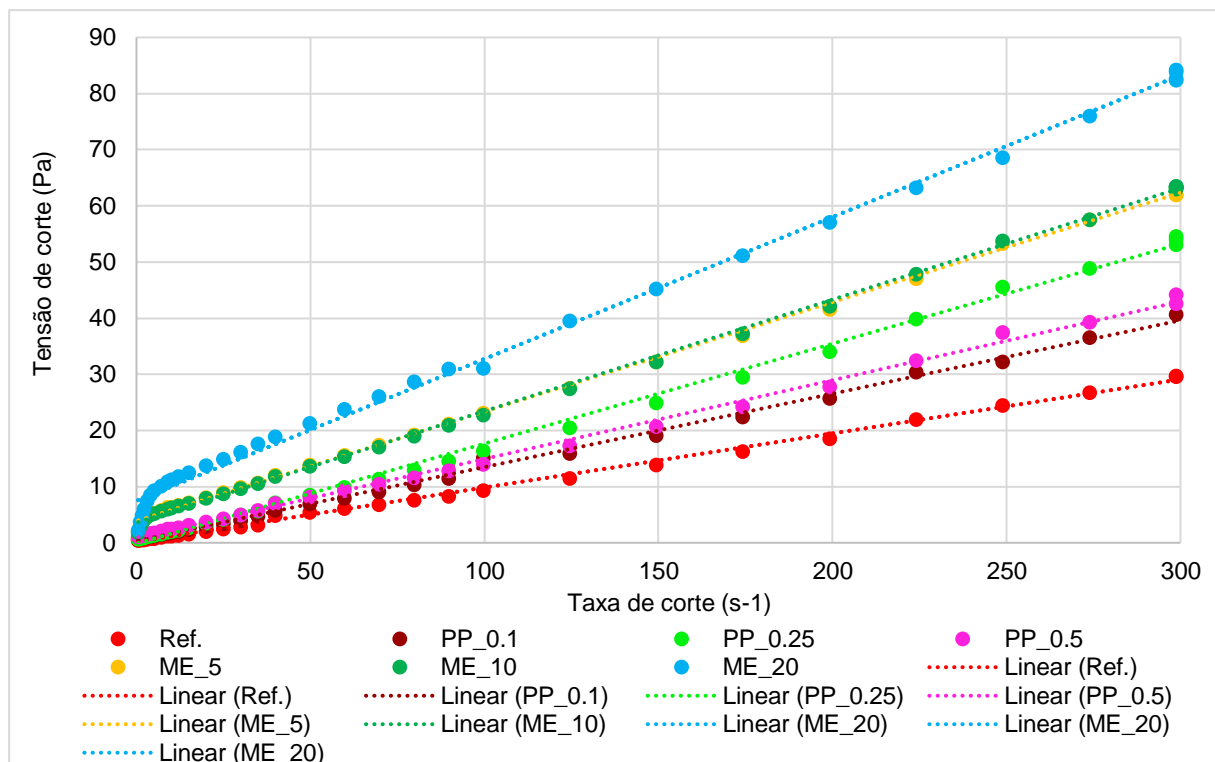


Figura 4.2 - Curvas de fluxo e recta de aproximação referentes a cada *grout* – Valores experimentais

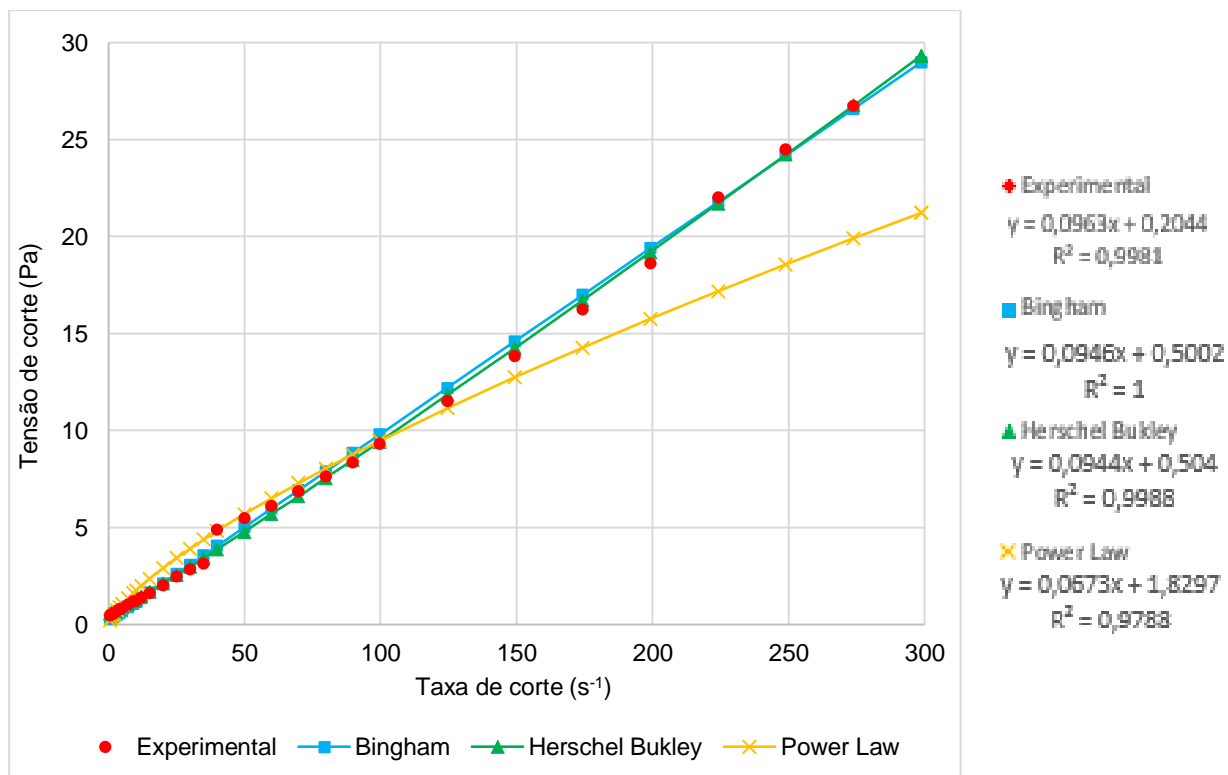


Figura 4.3 – Ajustamento dos modelos à curva de fluxo do *grout* de referência (Ref.) e respectivas equações das linhas de tendência

Através do modelo de Bingham obteve-se o coeficiente de viscosidade plástica (η_p) (Figura 4.4) e através do modelo de Herschel-Bulkley determinou-se a tensão de cedência (σ_0) (Figura 4.5) e a consistência (K) (Figura 4.6). Esperando valores baixos de tensão de cedência e de coeficiente de viscosidade plástica, uma vez que valores elevados destes parâmetros representam *grouts* de difícil escoamento o que é um obstáculo durante o processo de injeção. No que refere à consistência, se esta se apresentar baixa, significa que o *grout* flui facilmente, logo é o que se pretende na injeção de *grouts*.

- **O coeficiente de viscosidade plástica (η_p)** caracteriza a resistência interna do *grout* ao escoamento. Baixos coeficientes de viscosidade plástica indicam uma maior facilidade de escoamento dentro do núcleo interno de uma alvenaria. Na Figura 4.4 pode-se observar que, com o aumento das percentagens de PP, os coeficientes de cada *grout* não seguem uma linha de tendência, talvez derivado da falta de homogeneidade, i.e., segregação da amostra enquanto permaneceu nos pratos do reómetro. No que diz respeito ao aumento da percentagem de ME, ocorre simultaneamente um acréscimo do coeficiente de viscosidade com o aumento da dosagem de ME.

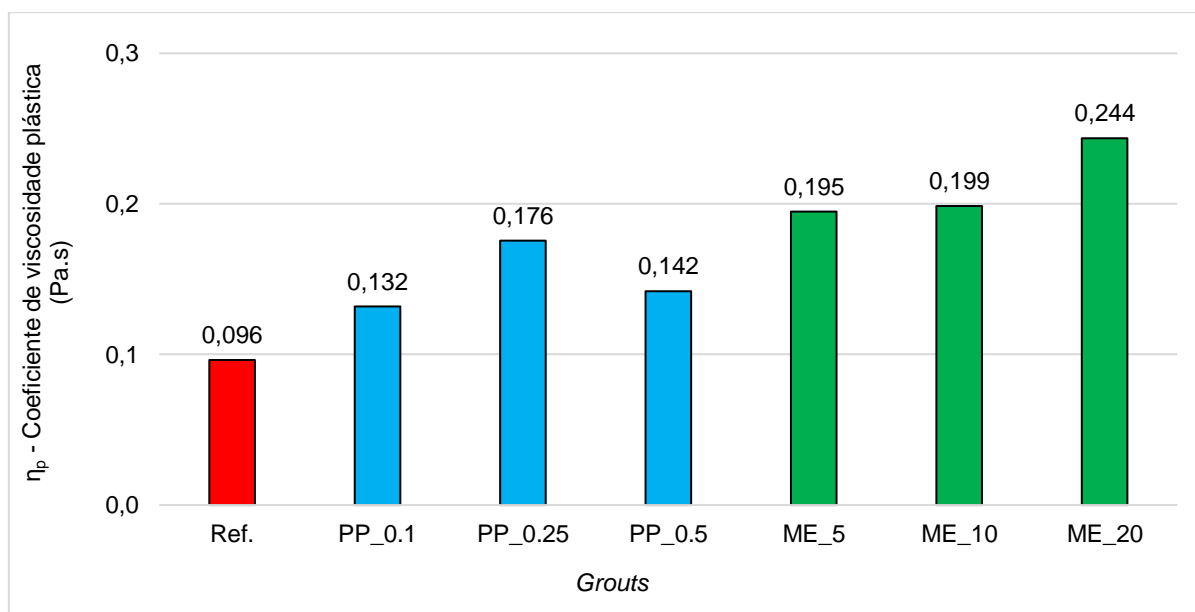


Figura 4.4 - Valores dos coeficientes de viscosidade plástica - modelo Bingham

No caso das fibras de polipropileno, uma das principais razões que leva à diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de corte é o facto das fibras possuírem uma forma alongada e, conseqüentemente, tenderem a adquirir orientações que favorecem o aumento do fluxo e, deste modo, a diminuição da viscosidade. Devido ao fenómeno anteriormente descrito é que os *grouts* em repouso apresentam ter elevada viscosidade, mas como se pode visualizar, quando submetidos a taxas de corte, as fibras orientam-se segundo o sentido do escoamento e o *grout* torna-se mais fluído. A adição de PP em argamassas calcárias já foi

objecto de estudo por parte de Bengjillali (2011), tendo essa adição diminuído a trabalhabilidade da argamassa, indo, assim, ao encontro dos resultados obtidos.

Quando às ME os valores obtidos não eram nada expectáveis pois, como referido no capítulo 2.3.1, a estrutura esférica da microesfera é a forma perfeita para uma injeção. Estrutura essa, que minimiza a área de superfície, permitindo maior carregamento de sólidos com menos impacto nas características de viscosidade e fluxo do compósito a injectar (Rosenbusch, 2003).

Contudo, o efeito do aumento da viscosidade plástica com a adição de microesferas, já foi obtido em alguns estudos onde foram adicionadas microesferas juntamente com diferentes tipos de solo (Simon ,2005). Este efeito poderá estar ligado às irregularidades esféricas das microesferas demonstradas no capítulo 3.2.3, resultando num aumento da superfície específica e do atrito entre partículas, o que provoca um aumento da viscosidade do *grout*.

- **A tensão de cedência (σ_0)** ou tensão limite de escoamento é a tensão necessária a aplicar num *grout* para que este comece a fluir (Baltazar, 2013). Está relacionada com a capacidade de o *grout* escoar quando é aplicada uma determinada taxa de corte. Como é possível observar na Figura 4.5, o *grout* de referência é o que apresenta menor tensão de cedência, e o *grout* com maior percentagem de ME o que apresenta maior tensão de cedência. Com o aumento da percentagem de ME e de PP, a tensão de cedência aumentou, sendo que no caso do *grout* com maior percentagem de ME (ME_20), obteve-se um valor 13 vezes superior ao *grout* de referência .

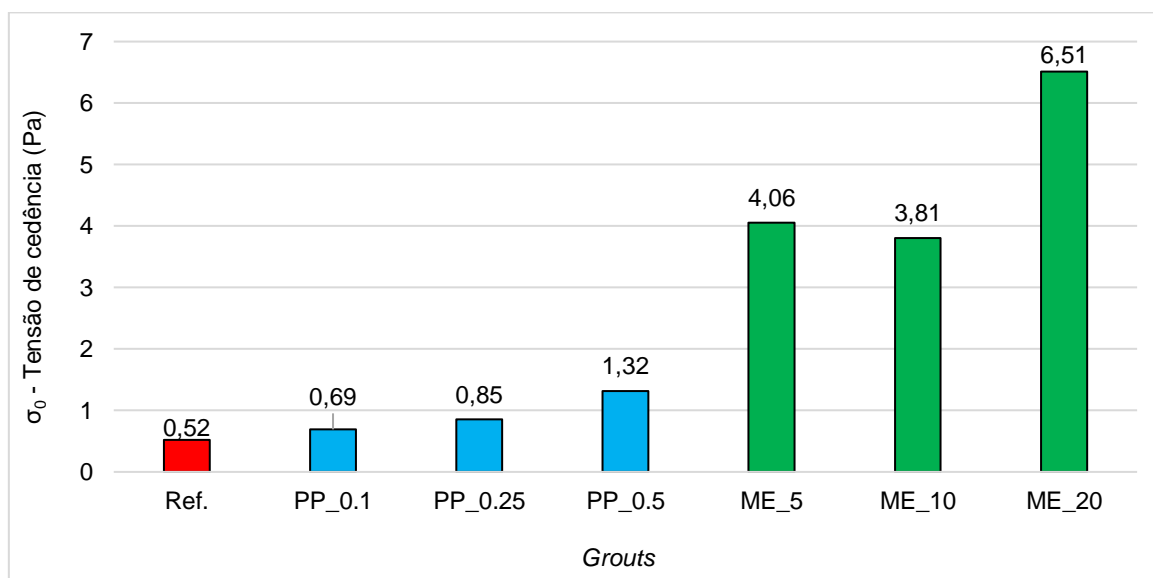


Figura 4.5 – Valores da tensão de cedência para cada *grout* – modelo de Herschel-Bulkley

Estes valores estão directamente ligados aos valores da viscosidade plástica, embora não sejam exactamente proporcionais devido a serem obtidos através de diferentes modelos.

Importa salientar que os valores dos *grouts* com adição de PP podem induzir em erro devido às razões enumeradas anteriormente, nomeadamente o escorregamento entre o *grout* e os pratos do reómetro.

- **Consistência (K)** associada à viscosidade do *grout*, segundo Herschel-Bulkley, é apresentada graficamente na Figura 4.6. Neste caso verificou-se que o aumento da percentagem de ME, conduz a um aumento da consistência. Quanto ao aumento da dosagem de PP os valores da consistência evidenciaram pouca alteração, embora tenha ocorrido um aumento de cerca de 150% relativamente ao *grout* de referência.

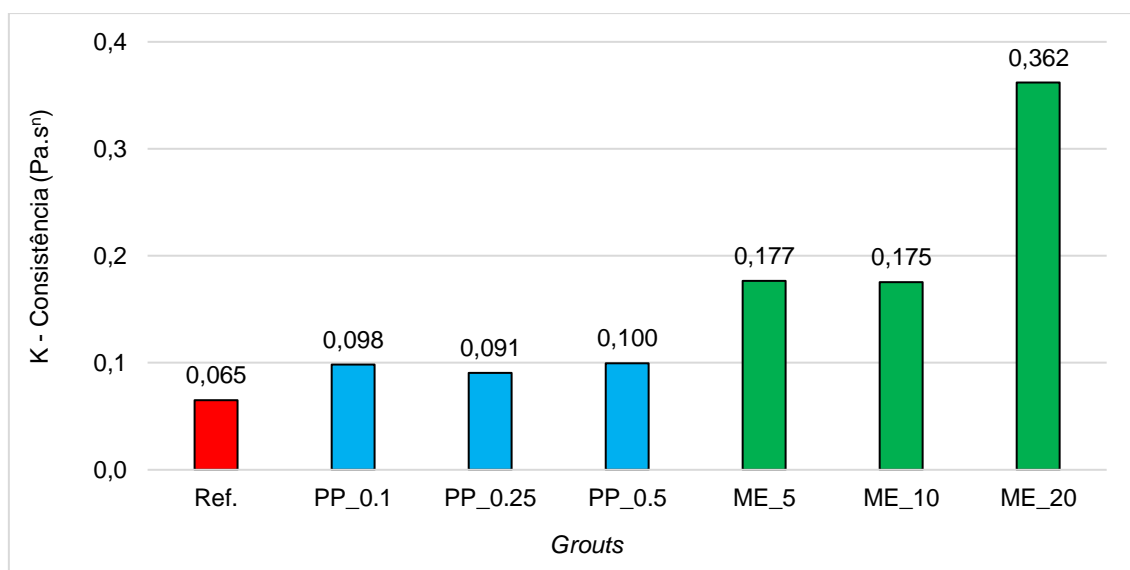


Figura 4.6 - Valores da consistência - modelo de Herschel-Bulkley

O aumento da consistência significa que o *grout* flui dificilmente, logo é o oposto do pretendido na injeção de *grouts*.

A consistência do betão e argamassa com adição de PP, analisada por Moreira (2018) e Camões (2013) através de ensaios de espalhamento e de testes de fluidez, também apresentou um aumento com a adição de PP, comparando com a sua ausência.

4.2. Ensaios realizados no estado endurecido

4.2.1. Resistência à tracção por flexão

Os resultados do ensaio à tracção dos provetes por flexão apresentam-se na Figura 4.7. Estes permitem determinar a resistência à tracção por flexão em função da dosagem de PP e ME.

Através da análise gráfica observa-se que pode existir uma dosagem de PP e ME que conduza a uma maior resistência à tracção, pois os *grouts* com menor percentagem de PP (PP_0.1) e ME (ME_5.0) demonstraram uma maior resistência comparativamente com os restantes *grouts*, valores esses com valores cerca de 4 vezes superiores aos valores do *grout* de referência. O aumento da resistência com a adição de fibras vai ao encontro dos estudos realizados por Moreira (2018), onde se utilizou diferentes tipos de fibras.

O aumento das dosagens de PP e ME diminuíram a resistência à tracção dos *grouts*, sendo que as maiores dosagens (PP_0.5 e ME_20) apresentaram valores muito próximos da mistura de referência. Este efeito da diminuição da resistência à tracção por flexão aquando do aumento da dosagem de ME foi também obtido por Semenov (2016) em *grouts* compostos por cimento Portland com a adição de superplastificante e incorporando ME.

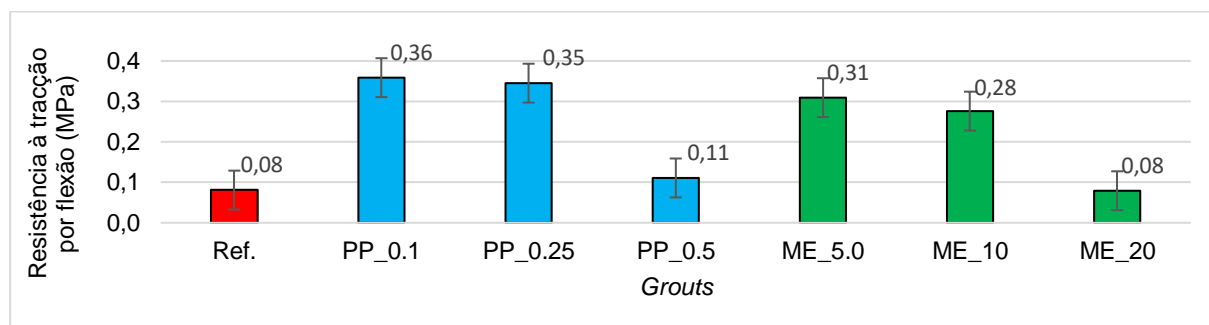


Figura 4.7 - Resultados do ensaio à tracção por flexão

Importa referir que nos provetes referentes aos *grouts* com adição de PP, a ruptura do provete não originou duas metades (Figura 4.8), pois as fibras resistiram à tracção por flexão.



Figura 4.8 - Ruptura de provete referente ao *grout* com adição de fibras de polipropileno

4.2.2. Resistência à compressão

A resistência à compressão é um parâmetro fundamental para os *grouts*, pois desempenha uma função de elevada importância nas paredes de alvenaria antigas. Por estas razões, pretende-se que o *grout* a injectar seja capaz de impor um aumento na resistência mecânica da parede de alvenaria.

Através do ensaio de resistência à compressão pode-se concluir, através da Figura 4.9, que a adição de ME apenas apresenta pequenas vantagens nas dosagens mais reduzidas (ME_5.0 e ME_10). Em relação à adição de PP, esta demonstrou ser bastante vantajosa, sendo que, nas menores dosagens (PP_0.1 e PP_0.25), apresentou aproximadamente o dobro da resistência comparativamente com a mistura de referência.

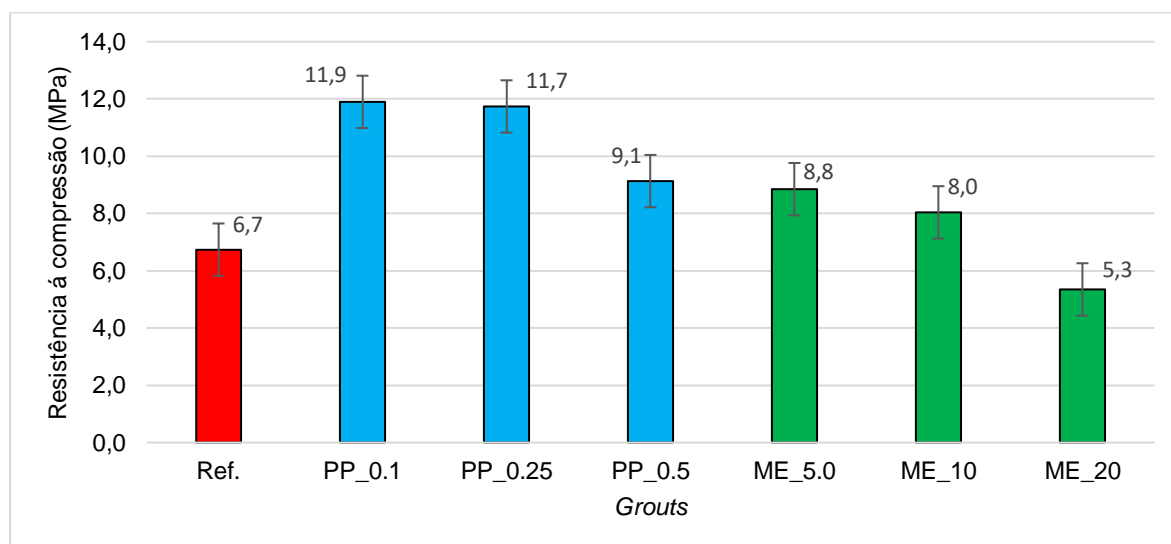


Figura 4.9 - Resultados do ensaio à compressão

Os resultados obtidos por Semenov (2016), em grouts compostos por cimento Portland com a adição de superplastificante e adicionando ME com diferentes percentagens demonstraram-se semelhantes aos obtidos no presente estudo, visto que o aumento da dosagem de ME levou a um decréscimo da resistência à compressão do *grout*.

Com a adição de PP os valores da resistência à compressão vão ao encontro dos resultados obtidos por Camões (2013), onde também se verificaram aumentos consideráveis de resistência à compressão.

4.2.3. Resistência ao ataque por cloretos

Neste ensaio foi demonstrado o comportamento dos *grouts* face à presença de sais ao longo do tempo/ciclos. Foram realizados dois tipos de análise: uma análise visual demonstrando a degradação dos provetes ao longo do ensaio e uma análise da variação de massa dos provetes.

Na Figura 4.10, é apresentado o gráfico que relaciona a variação de massa dos provetes em percentagem, com o número de ciclos do ensaio. Pode-se observar que durante o ensaio existe uma expansão dos provetes em todos os *grouts*, expansão esta originada pelo aumento do volume dos sais no estado sólido, criando fissuras que por sua vez vão permitindo a entrada de mais sais.

A partir do ciclo 12 começam a existir alguns decréscimos de massa, pois os provetes sofreram pequenas desagregações e surgiram algumas fissuras, sendo que no ciclo seguinte essas fissuras foram preenchidas pelo cloreto de sódio, o que levou a um aumento de massa do provete. Este comportamento também foi verificado por Gomes (2016). Os primeiros provetes que apresentaram menor resistência aos cloretos foram os que continham maior percentagem de ME (ME_10 e ME_20) e os de referência (Ref.), tendo um dos provetes referente ao *grout* ME_20 partido ao meio (grau de degradação 5) no 12º ciclo. Os provetes com adição de fibras de PP apresentavam inúmeras fissuras, mas derivado da microestrutura das fibras que proporciona uma melhor ligação, não chegou a haver nenhum destaque.

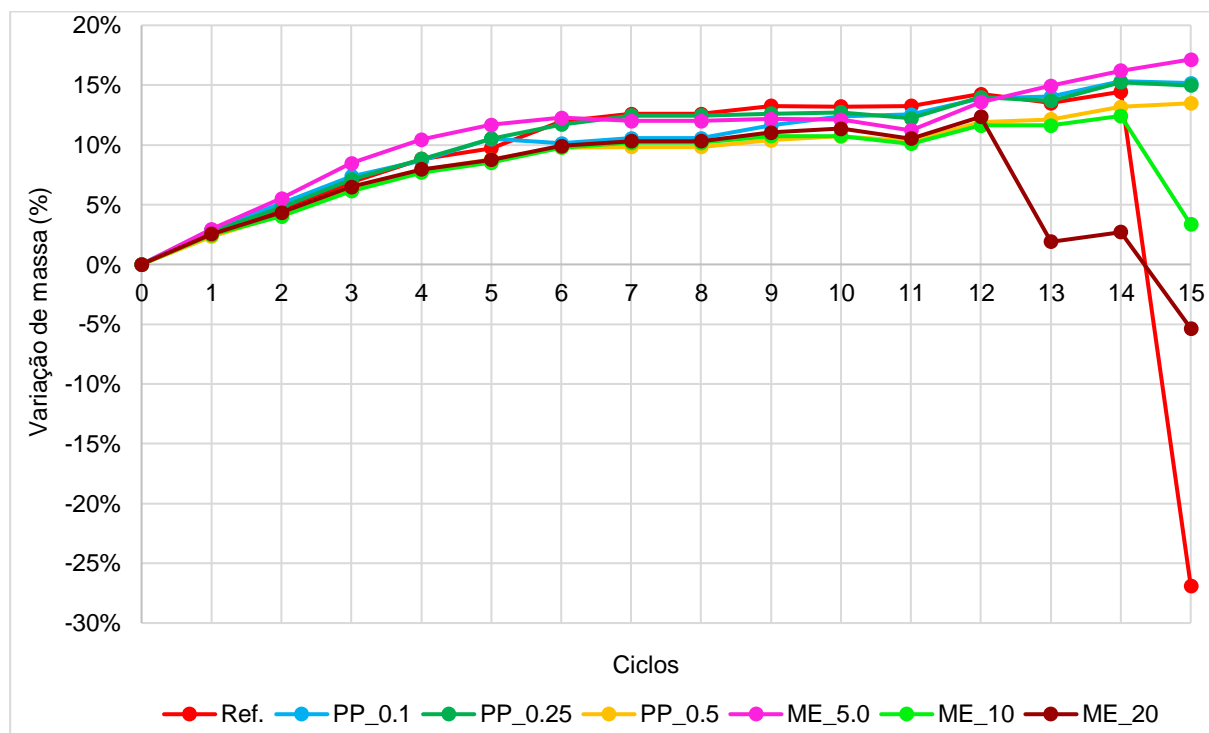


Figura 4.10 - Variação de massa ao longo dos ciclos

Quanto à análise visual existiram vários tipos de rotura, erosão, desgaste e empolamento provocado pelos cloretos. Essa análise foi quantificada visualmente numa escala de 1 a 5, detalhada no capítulo 3.5.3, e acompanhada pelo registo fotográfico de todos os ciclos (Figura 4.11). Desta forma, registaram-se os resultados num espectro de degradação (Tabela 4.1) de forma a identificar as tendências de degradação das misturas.

Tabela 4.1 - Graduação da degradação dos *grouts*

Ciclos	Grouts						
	Ref.	PP_0.1	PP_0.25	PP_0.5	ME_5.0	ME_10	ME_20
1º	0	0	0	0	0	0	0
2º							
3º							
4º	1	1	1	1	1	1	1
5º							
6º							
7º	2	2	2	2	2	2	2
8º							
9º							
10º		3	3	3	3	3	3
11º							
12º	3	4	4	4	4	4	4
13º	4						
14º	5	5	5	5	5	5	5
15º							



Grau 1



Grau 2



Grau 3



Grau 4



Grau 5

Figura 4.11 - Evolução da degradação dos provetes

4.2.4. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade tem como objectivo caracterizar os *grouts* quanto à sua absorção de água em função do tempo.

Neste âmbito foram realizadas, as curvas de absorção capilar referentes aos *grouts* que continham PP (Figura 4.12) e referentes aos que continham ME (Figura 4.13), durante 7200 minutos (5 dias). A partir destas curvas constata-se que a curto prazo de tempo (primeiros 360 minutos) os *grouts* com PP e com ME absorvem maior quantidade de água por área que a mistura de referência. Indo ao encontro dos resultados obtidos por Camões (2013), onde uma argamassa à base de cal, diferentes tipos de solo e areia incorporando PP, absorveu maior quantidade de água nos primeiros instantes, comparando com a argamassa sem adição de PP.

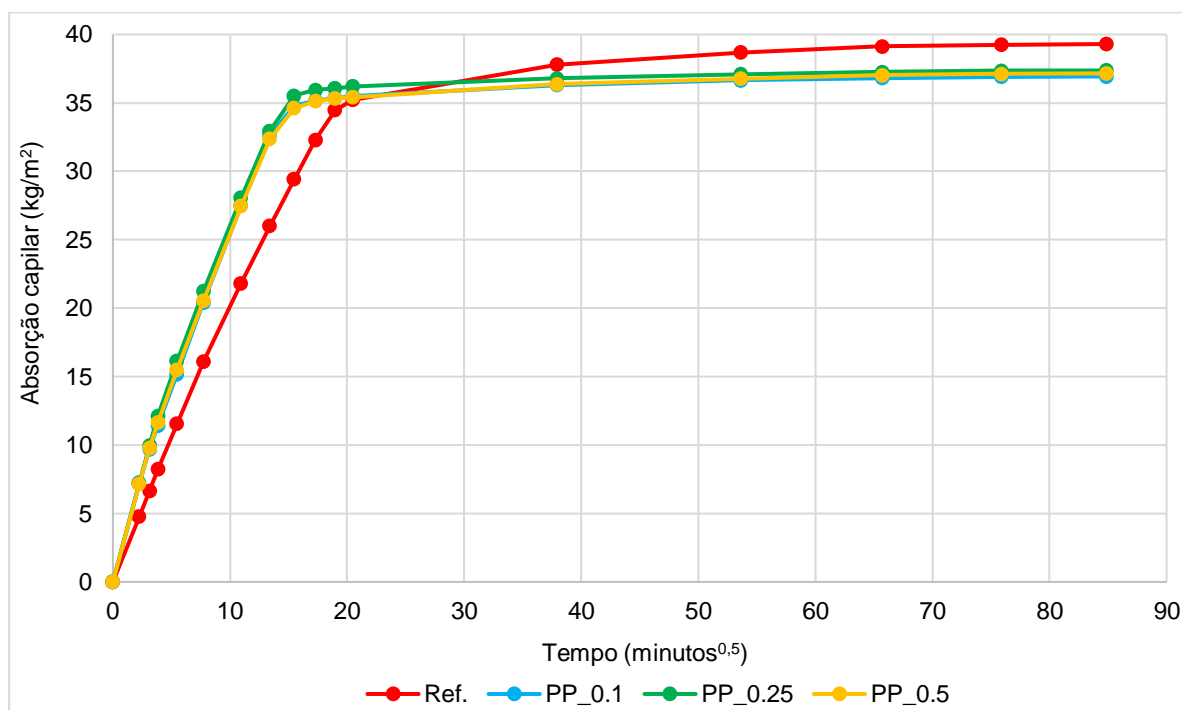


Figura 4.12 - Curvas de absorção de água por capilaridade - Fibras de polipropileno

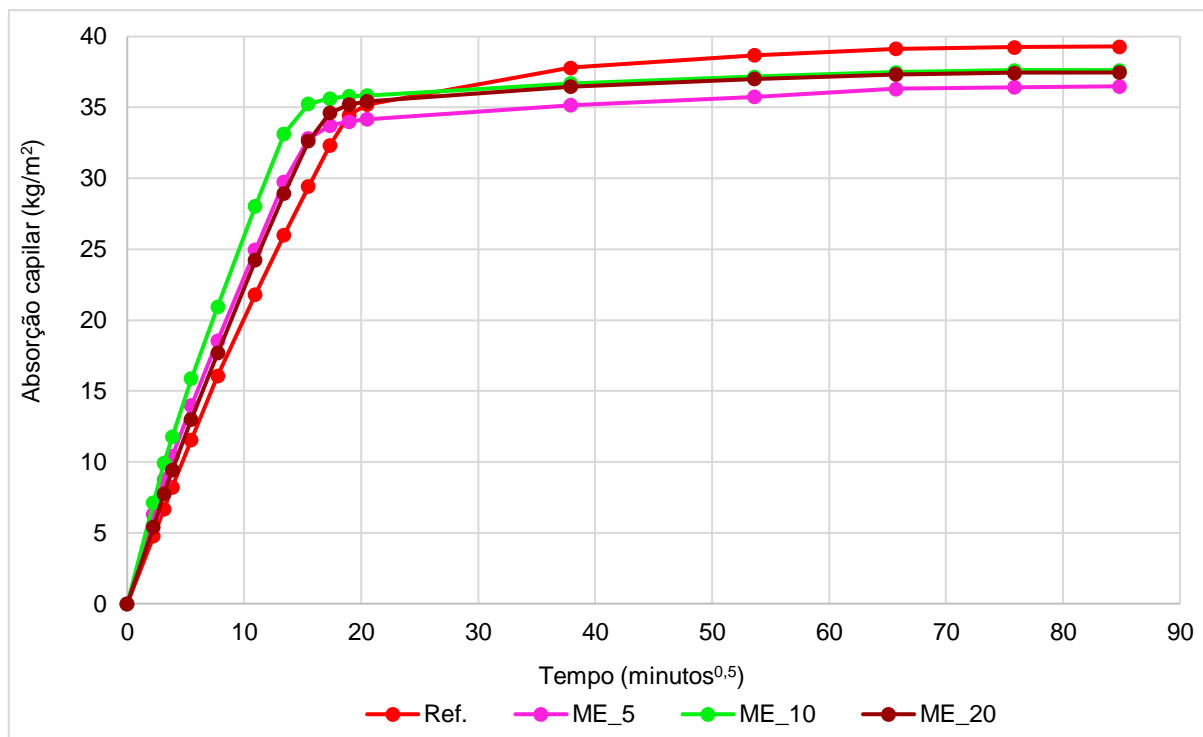


Figura 4.13 - Curvas de absorção de águas por capilaridade – Microesferas ocas de vidro

Baseando-se nas curvas de absorção é possível determinar os coeficientes de capilaridade, através do declive do troço recto inicial (primeiros 360 minutos) de cada *grout*, como pode-se observar através da Figura 4.14 referente aos *grouts* com adição de PP e na Figura 4.15 referente aos *grouts* com adição de ME.

Analisando essas figuras é possível concluir que a adição de PP e ME conduz a um maior coeficiente de absorção de água por capilaridade, mas não segue uma linha de tendência consoante o aumento das percentagens de PP e de ME.

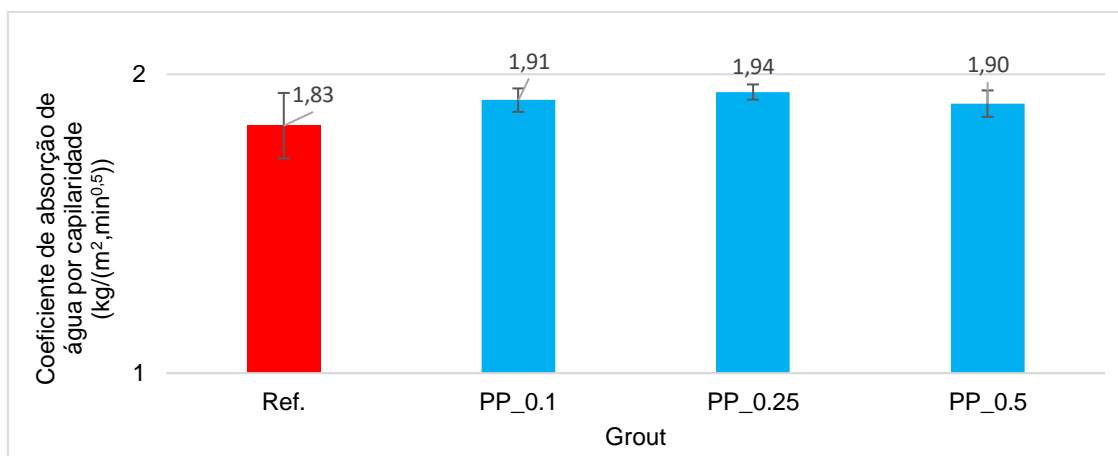


Figura 4.14 - Valores dos coeficientes de absorção de água por capilaridade - Fibras de polipropileno

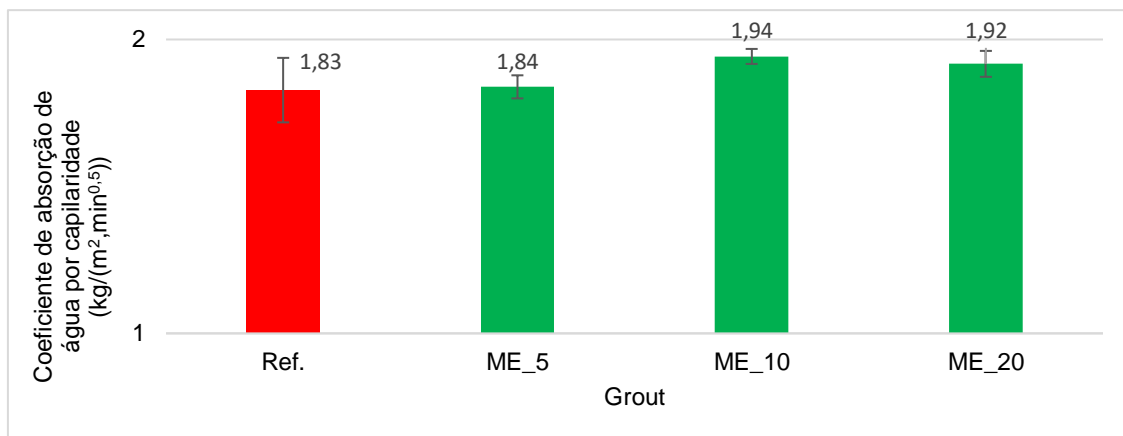


Figura 4.15 - Valores dos coeficientes de absorção de água por capilaridade - Microesferas ocas de vidro

As ME são um material de dimensões muito reduzidas, proporcionando eventualmente, microestruturas com maior compacidade que levam à redução das dimensões dos poros (Correia, 2013). Estes resultados não foram ao encontro dos resultados esperados, uma vez que as ME e as PP são dois materiais impermeáveis, a sua adição dificulta a absorção de água por capilaridade, ou seja, o aumento das dosagens de PP e ME deveriam conduzir a menores coeficientes de absorção de água por capilaridade.

Também estudado por Camões (2013), o coeficiente capilar da argamassa sem adição de PP, apresentou valores ligeiramente superiores aos da argamassa com adição de PP, ainda assim, esses valores apresentavam um elevado desvio padrão, podendo ir ao encontro dos resultados obtidos.

4.2.5. Secagem

O ensaio de secagem estuda a quantidade de água evaporada pelos provetes, logo após o ensaio de capilaridade, de forma a caracterizar a secagem unidireccional em função do tempo, realizado em condições ambiente controladas. O processo de secagem foi repartido em três fases diferentes: na primeira fase, após o ensaio de absorção de água e, com o início da secagem, a água líquida é transportada até à superfície do material devido maioritariamente a forças de capilaridade, iniciando-se a evaporação da água; na segunda fase, a frente de secagem recua para o interior do material, levando a um maior percurso da difusão de vapor e originando a diminuição da taxa de secagem. Esta fase começa quando deixa de existir água líquida, à superfície do provete, embora na frente de secagem continue a existir mais recuada, no interior do provete. Na terceira fase, a taxa de secagem diminui lentamente até ao equilíbrio higroscópico.

Para relacionar a percentagem de massa de água retida em função o tempo, elaborou-se as curvas de secagem referentes à incorporação de fibras de polipropileno e microesferas ocas de vidro (Figura 4.16 e 4.17).

Pode-se observar que todas as misturas apresentaram um comportamento constante, não existindo qualquer variação brusca nas percentagens de água retida. Embora o ensaio tenha decorrido durante 14 dias (336 horas), não se verificou um patamar de estabilização.

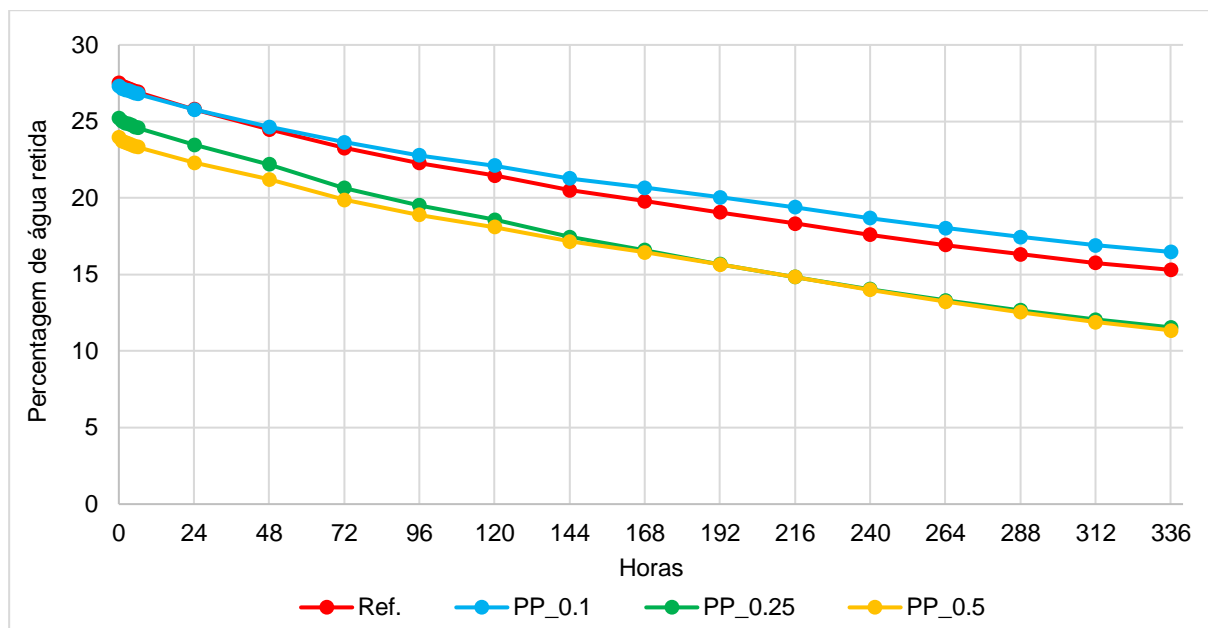


Figura 4.16 - Curvas de secagem - Fibras de polipropileno

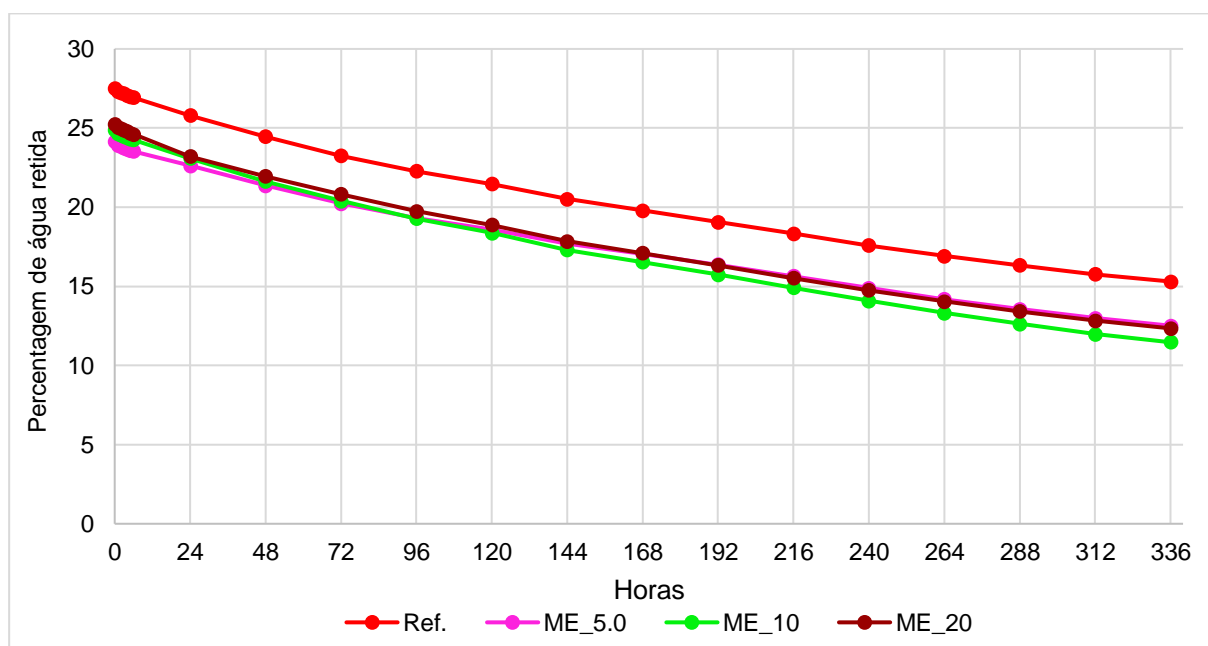


Figura 4.17 - Curvas de secagem – Microesferas ocas de vidro

Nos gráficos das Figuras 4.18 e 4.19, é apresentada a taxa de secagem em função das diferentes dosagens de PP e ME, respectivamente, traduzindo uma maior rapidez de perda de água das misturas nos instantes iniciais. Essa taxa foi calculada através do declive do troço correspondente às primeiras 24 horas. Pela observação gráfica, é possível verificar que o aumento da

dosagem de PP não segue uma tendência, ou seja, não se verifica um aumento ou diminuição da taxa de secagem, apenas se pode afirmar que tem menor taxa de secagem relacionando com a mistura de referência. No caso das ME, apenas o *grout* que contém maior dosagem (ME_20) apresenta valores superiores de taxa de secagem comparando com a mistura de referência. O aumento da dosagem de ME leva a um aumento da taxa de secagem, mas é que ter em atenção o elevado desvio padrão.

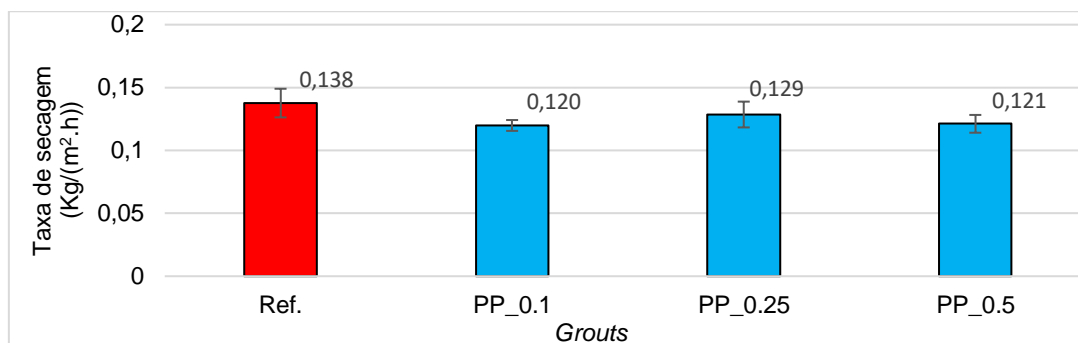


Figura 4.18 - Taxa de secagem - Fibras de polipropileno

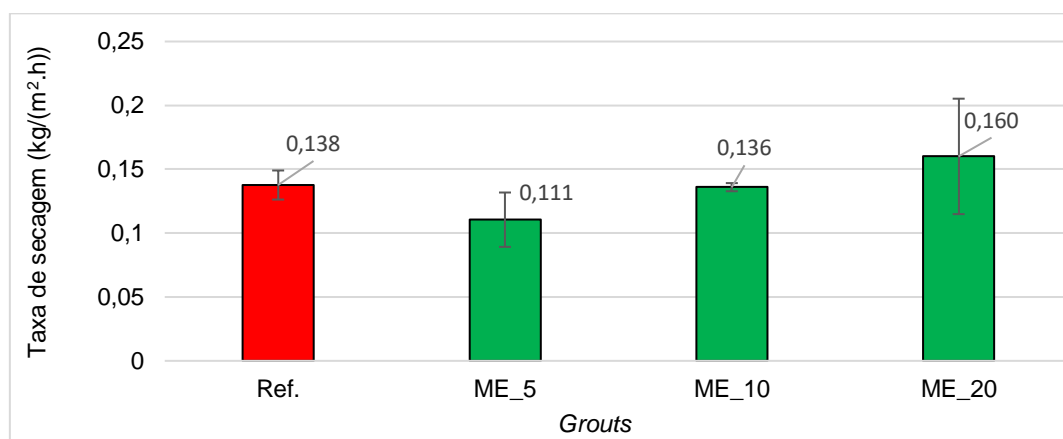


Figura 4.19 - Taxa de secagem – Microesferas ocas de vidro

Sendo as ME e as PP dois materiais impermeáveis, a sua adição facilita a secagem, ou seja, o aumento das dosagens de PP e ME deveriam conduzir a maiores taxas de secagem, tal não se verificou devido ao consequente aumento de compacidade das misturas, o que dificulta uma rápida secagem.

Observando os valores obtidos por Camões (2013), verifica-se que obteve resultados semelhantes, referentes à taxa de secagem dos *grouts* com adição de PP.

4.2.6. Porosidade aberta e massa volúmica

A massa volúmica e a porosidade aberta fornecem informação relevante no que diz respeito ao comportamento dos *grouts* no estado endurecido e à eficiência da intervenção nas paredes de alvenaria antigas.

Após estes ensaios, deduziu-se a compacidade dos provetes e pôde-se correlacionar, com a resistência mecânica e com a capacidade de absorção de água.

Através da realização dos ensaios obteve-se o gráfico de barras (Figura 4.20) referente à massa volúmica dos diferentes *grouts* analisados e pode-se concluir que a massa volúmica dos *grouts* aumentou com adição de PP e ME. Estes resultados podem advir da finura das ME e das PP, originando uma microestrutura interna mais compacta e com eventual redução da dimensão dos poros.

Estes resultados vão ao encontro dos resultados obtidos anteriormente nos ensaios de absorção de água por capilaridade, onde a dimensão dos poros está directamente envolvida. Ou seja, os coeficientes de absorção água por capilaridade aumentaram, consoante a adição de PP e ME.

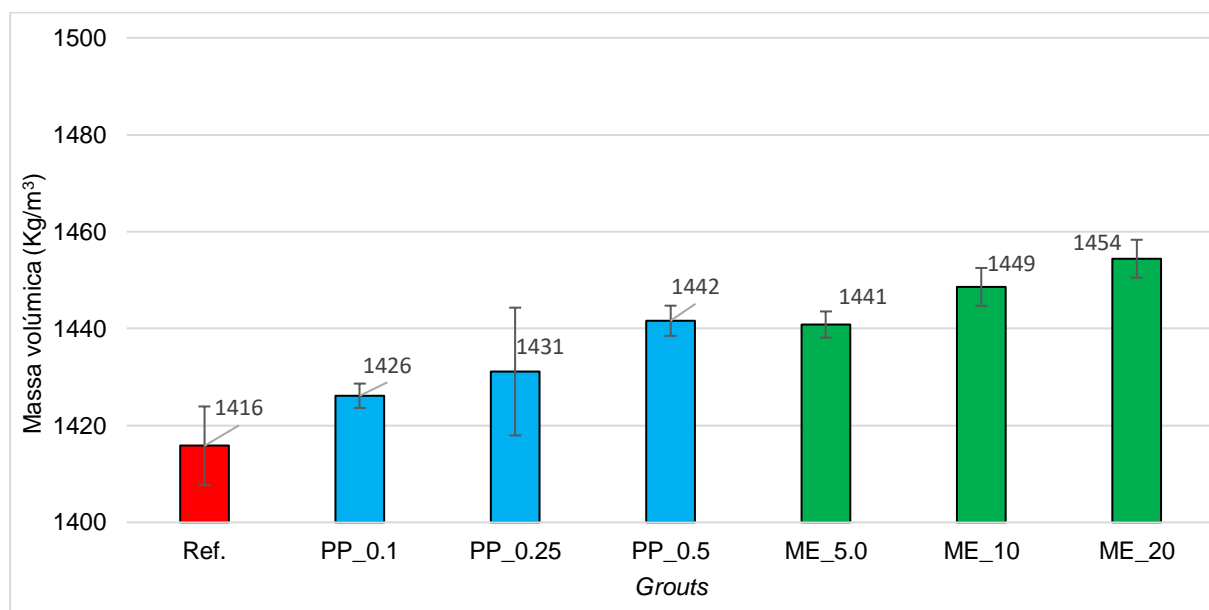


Figura 4.20 - Resultados do ensaio de massa volúmica

Quanto à porosidade aberta, os resultados obtidos permitem determinar e analisar, o volume de poros abertos ao exterior, em percentagem. Desta forma é possível quantificar a compacidade de cada *grout*, dado que um baixo valor de porosidade aberta conduz a uma maior compacidade do *grout*.

Analisando a Figura 4.21, é possível verificar que os *grouts* com adição de PP e ME que apresentam menores percentagens de porosidade aberta, são os mesmos que apresentam maiores valores de resistência à compressão (PP_0.1 e ME_5.0), ou seja, os *grouts* que apresentam maiores resistências à compressão são os que possuem uma percentagem de porosidade mais reduzida.

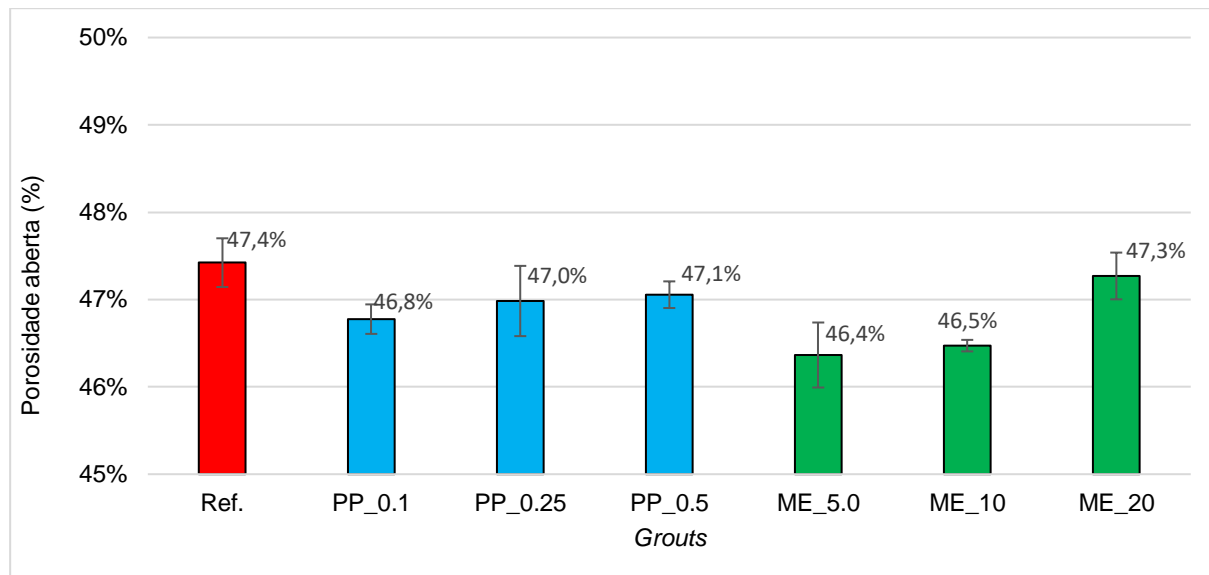


Figura 4.21 - Resultados do ensaio de porosidade aberta

Estes resultados podem ser validados por Al-Ghaban (2018) que obteve resultados semelhantes aquando o aumento das dosagens de fibras de nylon e fibras de vidro em argamassas de cimento.

4.2.7. Termogravimetria

A termogravimetria é uma técnica em que massa do material é monitorizada em função da temperatura, numa atmosfera controlada. Com o aumento de temperatura ocorre a perda de massa em determinadas temperaturas consequência de reacções.

Os resultados deste ensaio são posteriormente exportados e analisados sob a forma de curvas DTG, com a temperatura em abcissas e a derivada da variação de massa em ordenadas (Figura 4.22).

Através da análise das curvas associadas aos diferentes *grouts* observam-se três picos associados a quatro temperaturas diferentes. Com o aumento de temperatura, no primeiro pico, até aos 150°C ocorre a evaporação de água quimicamente interligada aos produtos da reacção (silicatos e aluminatos). No pico seguinte, entre os 450 os 650°C, ocorre a reacção da desidroxilação, que é a perda de água associada ao hidróxido de cálcio. No último pico, entre os 650 e os 1000°C, ocorre a reacção da descarbonatação, onde é libertado dióxido de carbono por parte do carbonato de cálcio.

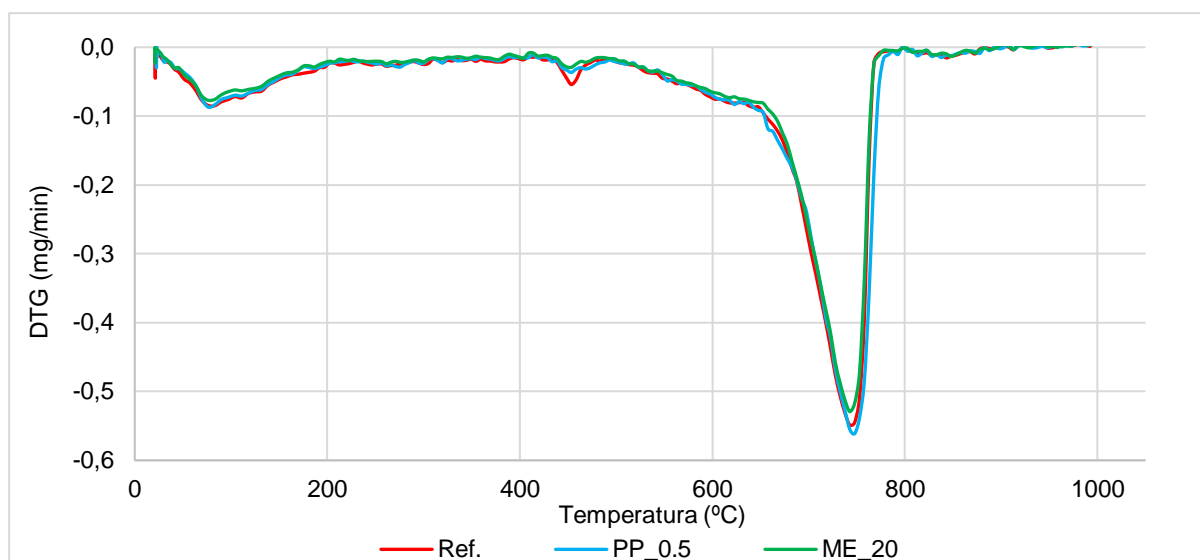


Figura 4.22 - Curvas DTG referentes aos diferentes tipos de *grouts*

A reacção de desidroxilação origina água e óxido de cálcio e a reacção da decarbonatação origina dióxido de carbono e óxido de cálcio. A água e o dióxido de cálcio formados nestas reacções são elementos voláteis, enquanto o óxido de cálcio é o elemento sólido (Matos, 2013).

A desidroxilação do hidróxido de cálcio é o fenómeno mais relevante e ocorre por volta dos 453°C, como se pode observar através da Figura 4.23. As perdas de massa não se apresentaram muito significativas. Tal facto pode advir do elevado número de dias de cura dos *grouts*, tal como demonstrado por Matos (2013) onde foi realizado o ensaio termogravimétrico ao longo das diferentes idades dos *grouts*. Ainda assim, pode concluir-se que a adição PP e ME teve influência na quantidade de hidróxido de cálcio presente nos *grouts*, pois existe uma menor perda de massa com a presença de PP e ME. Em que, as ME apresentaram valores mais reduzidos de perda de massa. Este fenómeno pode eventualmente ser explicado pela reacção da sílica das ME com o hidróxido de cálcio.

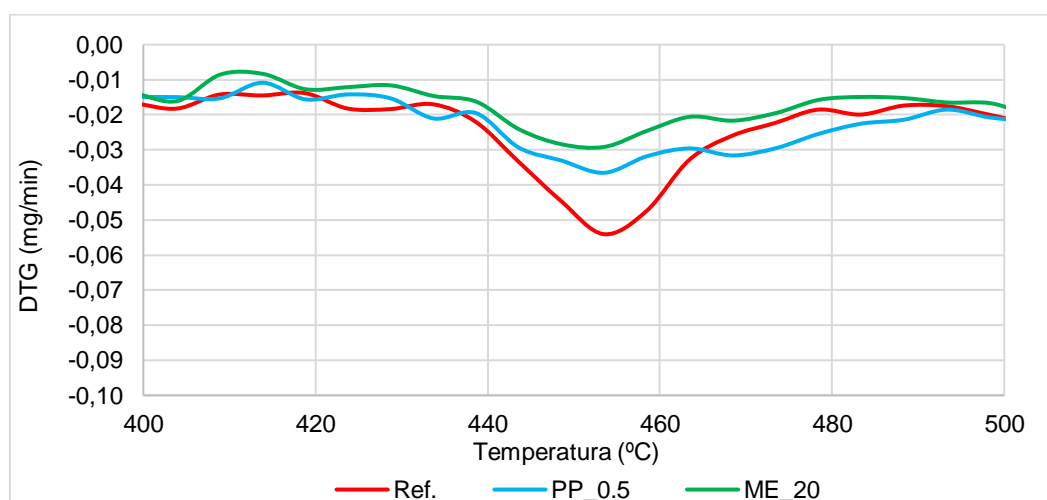


Figura 4.23 - Curvas DTG - Desidroxilação do hidróxido de cálcio






4.3. Síntese dos resultados

Como já referido anteriormente, um dos principais requisitos para um bom desempenho de um *grout* de injeção é a sua capacidade para preencher os espaços vazios, com o intuito de devolver o comportamento monolítico das paredes de alvenaria de múltiplos panos. No acto da injeção, para que este *grout* tenha uma boa capacidade de escoamento dentro do meio poroso, a viscosidade plástica, a tensão de cedência e a consistência devem ter valores o mais reduzidos possíveis. Apesar de não se ter realizado o ensaio de injectabilidade, pode-se aferir a partir do ensaio realizado no estado fresco que a adição de PP e ME não favorece a fluidez dos *grouts*. A partir dos ensaios no estado endurecido, nomeadamente a absorção de água por capilaridade e a secagem, os resultados obtidos também foram nefastos comparativamente à composição de referência; por outro lado fornecem melhorias relativamente à resistência ao ataque por cloretos e melhores resistências mecânicas, obtendo maior durabilidade.

A título de resumo do presente capítulo, foi elaborada a Tabela 4.2, de forma a explanar os valores dos parâmetros/propriedades dos ensaios realizados e em prol da optimização da técnica de injeção de *grouts*. A tabela avalia cada um desses valores consoante a sua acção benéfica ou prejudicial.

Tabela 4.2 - Resumo e avaliação dos resultados obtidos através dos ensaios

	Ensaio	Propriedades/ Parâmetros	Grouts						
			Ref.	PP_0.1	PP_0.25	PP_0.5	ME_5.0	ME_10	ME_20
Estado fresco	Reológico	Tensão de cedência (Pa)	0,52	0,69	0,85	1,32	4,06	3,81	6,51
		Viscosidade plástica (Pa.s)	0,096	0,132	0,176	0,142	0,195	0,199	0,244
		Consistência (Pa.s ⁿ)	0,065	0,098	0,091	0,1	0,177	0,175	0,362
Estado endurecido	Absorção de água por capilaridade	Coef. capilar (Kg/(m ² .min ^{0.5}))	1,83	1,91	1,94	1,90	1,84	1,94	1,92
	Secagem	Taxa de secagem (Kg/m ² .h)	0,138	0,12	0,129	0,121	0,111	0,136	0,16
	Ataque por cloretos	Grau de degradação final	5	4	3	3	2	4	5
	Resistência à compressão	Rc (MPa)	6,7	11,9	11,7	9,1	8,8	8,0	5,3
	Resistência à tracção	Rt (MPa)	0,08	0,36	0,35	0,11	0,31	0,28	0,08
	Porosidade aberta	P.A. (%)	47,4	46,8	47,0	47,1	46,4	46,5	47,3
	Massa volúmica	MV (Kg/m ³)	1416	1426	1431	1442	1441	1449	1454
	Termogravimetria	Perda massa a 453 °C (mg/min)	0,54	-	-	0,37	-	-	0,29

Muito Benéfico  Benéfico  Indiferente  Prejudicial  Muito prejudicial 

Os resultados no estado fresco não foram ao encontro dos resultados pretendidos, principalmente no que diz respeito à adição de microesferas de vidro, em que o efeito de micro rolamentos não se verificou eficaz na melhoria da fluidez dos *grouts*. Essa fluidez analisada através dos ensaios reológicos, quando comparada com outros estudos de *grouts* realizados, nomeadamente Miguel (2017) em que incorporou hidrófugo comercial, silicone e óleo de linhaça, Gouveia (2017) que incorporou nano partículas de sílica e Cardoso (2018) que adicionou micro e nano partículas de sílica, demonstra valores aproximados de viscosidade plástica, podendo-se assumir que em termos absolutos os valores obtidos são aceitáveis para uma boa injeção de *grouts*, proporcionando uma boa fluidez do fluxo de injeção a uma pressão aceitável.

No que diz respeito aos resultados no estado endurecido, à que destacar a resistência mecânica dos *grouts* com adição de fibras de polipropileno e microesferas de vidro, pois obtiveram-se resultados muito promissores. Em que, no caso dos *grouts* com adição de fibras de polipropileno apresentaram valores de resistência à compressão duas vezes superiores aos obtidos por Cardoso (2018), nos *grouts* com maior dosagem de micro-sílica e nano-sílica e também aproximadamente duas vezes superiores aos valores obtidos por Miguel (2017), com a adição de óleo de linhaça e hidrófugo vegetal, ambos à base de cal hidráulica natural.

A adição de fibras de polipropileno e de microesferas de vidro levou a um aumento dos coeficientes de absorção de água por capilaridade e uma redução das taxas de secagem. Embora não se possa deduzir com certezas devido à proximidade entre os valores obtidos e elevados desvios padrões, os resultados levam a querer que a adição de fibras de polipropileno e de microesferas de vidro possa ser ligeiramente prejudicial no âmbito da injeção de *grouts*, pois no caso da absorção de água por capilaridade, esta leva ao aparecimento de humidade no interior das paredes de alvenaria e no caso da secagem conduz a uma secagem mais lenta. Ainda assim, comparando os resultados obtidos, com os resultados do estudo realizado por Camões (2013), em que analisou argamassas com cal, terra e adicionou fibras de coco, fibras de sisal, fibras de banana e fibras de polipropileno, conclui-se que em termos absolutos os valores obtidos apresentam um bom comportamento quanto à secagem após a absorção de água por capilaridade, revelando que estes não comprometerão a humidade relativa no interior das paredes de alvenaria. Quanto à adição de microesferas os resultados obtidos demonstram o mesmo comportamento obtido no estudo realizado por Shahidan (2016), em que a adição de microesferas de vidro em betão leve conduziu a um aumento da percentagem de água absorvida. Os resultados dos coeficientes de absorção dos *grouts* que continham microesferas de vidro foram muito próximos dos valores da adição de fibras de polipropileno, logo pode-se concluir que o seu comportamento em termos absolutos é também ele positivo.

A massa volúmica e a porosidade aberta não apresentaram grande variação de resultados, verificando-se no caso da porosidade aberta uma oscilação máxima de 1%, logo não se pode concluir que a adição de fibras de polipropileno e microesferas de vidro seja benéfica ou prejudicial.

5. Conclusões

Neste capítulo, de uma forma geral, serão apresentadas as conclusões retiradas com a realização do presente estudo, relacionando os fundamentos apresentados com os resultados dos ensaios desenvolvidos.

Sendo este um estudo inovador e face à pouca informação acerca do uso de PP e ME neste tipo de aplicação, serão apresentadas sugestões para que no futuro através de novos estudos possam surgir novas informações, metodologias e ideias.

5.1. Conclusões gerais

A adição de diferentes dosagens de PP (0,1%; 0,25% e 0,5%) e ME (5%; 10% e 20%) nos *grouts* de NHL, com um rácio água/ligante de 0,5 e com 0,2% de SP foram analisadas no estado fresco, adquirindo as propriedades reológicas referentes à injeção de *grouts*. Dessa análise surgiram as seguintes conclusões:

- ✓ O aumento das dosagens de PP e ME , comparando com o *grout* de referência, aumentou a viscosidade plástica, a tensão de cedência, e consistência dos *grouts*, indo no sentido contrário do pretendido para uma boa injeção de *grouts*. A adição de PP levou a um aumento médio de aproximadamente 150% em todas estas propriedades. Sendo que a adição de ME demonstrou ser ainda mais prejudicial, já que apresentou um aumento médio de aproximadamente 2 vezes mais na viscosidade plástica, 10 vezes mais na tensão de cedência e 300% na consistência.
- ✓ O uso de SP em pó provou ser melhor do que o SP líquido utilizado em estudos passados, pois a sua introdução na mistura em seco facilita o processo de amassadura, evitando a formação de grumos aquando da junção do ligante com a água de amassadura, permitindo reduzir os valores obtidos no ponto anterior.

Quanto às propriedades analisadas no estado endurecido:

- ✓ A adição de PP e ME resultou em *grouts* com maiores resistências à tracção por flexão e à compressão, sendo que a adição de PP (PP_0.1 e PP_0.25) conduziu a valores 4 vezes superiores de resistência à tracção por flexão e dobro da resistência à compressão, comparando com mistura de referência (Ref.).

- ✓ A absorção de água por capilaridade e a secagem demonstraram resultados insatisfatórios com a adição de PP e ME, pois são materiais de dimensões muito reduzidas, proporcionando eventualmente, microestruturas com maior compacidade que levam à redução das dimensões dos poros.
- ✓ A massa volúmica dos grouts sofreu um ligeiro aumento, aquando o aumento das dosagens de PP e ME, resultando num consequente aumento de compacidade.
- ✓ A porosidade aberta demonstrou resultados pouco conclusivos, embora coerentes com os resultados dos ensaios de resistência mecânica e com os ensaios de absorção de água por capilaridade. Os menores valores de porosidade aberta, ou seja, os que apresentam menor volume de vazios e consequente maior compacidade, coincidem com os *grouts* que apresentam maiores resistências mecânicas e com a menor quantidade de água absorvida.
- ✓ Os *grouts* que continham menor percentagem de ME (ME_10 e ME_5.0) e os que continham maior percentagem de PP (PP_0.25 e PP_0.5) apresentaram maior resistência face ao ataque por cloretos.

Em suma, a realização do presente estudo que visou a optimização de grouts à base de cal hidráulica natural com a adição de materiais inovadores, como as PP e as ME, pode considerar-se que o objectivo inicialmente proposto foi alcançado, embora ainda existam vários desenvolvimentos que possam optimizar este estudo.

5.2. Desenvolvimentos futuros

A incorporação de microesferas ocas de vidro e de fibras de polipropileno em *grouts* de injeção para a consolidação de alvenarias antigas têm sido alvo de poucos estudos, como comprovado pela pouca bibliografia existente. Assim, para uma melhor compreensão do tema abordado, sugerem-se os seguintes estudos:

- ✓ Realização de ensaios que forneçam outras propriedades importantes na caracterização de *grouts*, tais como a retracção, retenção de água, porometria, aderência e módulo de elasticidade.
- ✓ Adição de diferentes pozolanas em conjunto com microesferas ocas de vidro e fibras de polipropileno.

- ✓ Variar a dosagem de superplastificante e o rácio a/l.
- ✓ Utilizar diferentes granulometrias e dimensões de microesferas ocas de vidro e de fibras de polipropileno.
- ✓ Simular a injeção de *grouts* em modelos reduzidos que reproduzam as propriedades físicas e mecânicas de uma alvenaria antiga.

Referencias bibliográficas

- Al-Ghaban, A., & Jaber, H. A. (2018) - Investigation of Addition Different Fibers on the Performance of Cement Mortar - *Engineering and Technology Journal*. 36, 957-965.
- Baltazar, L. G., Henriques, F. M. A., & Cidade, M. T. (2015). Contribution to the design of hydraulic lime-based grouts for masonry consolidation. *Journal of Civil Engineering and Management*, 21(6), 698–709.
- Baltazar, L. G., Henriques, F. M. A., & Jorne, F. (2012). Optimisation of flow behaviour and stability of superplasticized fresh hydraulic lime grouts through design of experiments. *Construction and Building Materials*, 35, 838–845.
- Baltazar, L. G., Henriques, F. M. A., Jorne, F., & Cidade, M. T. (2013). Performance improvement of hydraulic lime based grouts for masonry consolidation: *An experimental study*. *WIT Transactions on the Built Environment*, 131, 417–430.
- Baltazar, L. G., Henriques, F. M. A., Jorne, F., & Cidade, M. T. (2013). The use of rheology in the study of the composition effects on the fresh behaviour of hydraulic lime grouts for injection of masonry walls. *Rheologica Acta*, 52(2), 127–138.
- Baltazar, L. G., & Henriques, F. M. A. (2015), Rheology of Grouts for masonry injection, *Key Engineering and Materials*, 624, 283–290.
- Barnes, H. A. (2000). *A Handbook of Elementary Rheology*. *Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics -University of Wales*. ISBN:0953803201
- Bendjillali, K., Goual, M. S., Chemrouk, M., & Damene, Z. (2011). Study of the reinforcement of limestone mortars by polypropylene fibers waste. *7^o International Conference on Materials Sciences (CSM7)*, 20-22 May, 2010, Beirut, Lebanon.
- Binda, L., Modena, C., Baronial, G., & Abbaneol, S. (1997). Repair and investigation techniques for stone masonry walls. *Construction and Building Materials*, 11(3), 133–142.
- Binda, L., & Saisi A. (2000). Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. *Construction and Building Materials*, 14, 199–233.
- Binda, L., & Saisi A. (2002). State of art of research on historic structures in Italy. *Proceedings of 11^o Advanced. Research Initiation Assisting and Developing Networks in Europe (ARIADNE) workshop 10*, 22-28 April, 2002, Prague, Czech Republic.

- Bindiganavile,V., Islam, M. T., & Suresh, N. (2016), Evaluation of water permeability in fiber reinforced hydraulic lime mortar intended for conservation. *Engineering Materials*, 711, 630-637.
- Bras A., & Henriques F., (2009). The influence of the mixing procedures on the optimization of fresh grout properties, *Materials and Structures*, 42, 1423-1432.
- Camões, A., Eires, R., & Cardoso, C. (2013). Natural Fibre Reinforced Earth and Lime Based Mortars. *Contribution of Sustainable Building to Meet EU 20-20-20 Targets*. Universidade do Minho. ISBN: 978-989-96543-7-2.
- Cardoso, T. F. A. (2015). Influência da exsudação e da perda de água nas propriedades reológicas de grouts. *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil*. FCT - UNL.
- Cardoso, J. A. L. (2018). Efeito conjunto da micro e nano sílica em grouts de cal hidráulica natural. *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil*. FCT - UNL.
- CEN (1999) EN 1015-11: Methods of test for mortar for masonry, part 11. Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels, European Committee for Standardization.
- CEN (1999) EN 12370: Natural stone test methods. Determination of resistance to salt crystallization. Brussels, European Committee for Standardization.
- CEN (2002) EN 1015-18: Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardener mortar. Brussels, European Committee for Standardization.
- CEN (2006) EN 1936: Natural stone test methods. Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity. Brussels, European Committee for Standardization.
- CEN (2010) EN 459-1: Building lime - Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria. Brussels, European Committee for Standardization.
- CEN (2013) EN 16322: Conservation of Cultural Heritage - Test methods - Determination of drying properties. Brussels, European Committee for Standardization.
- Comissão Europeia (2014). Rumo a uma abordagem integrada do património cultural europeu. *Comunicação da comissão ao parlamento europeu, ao conselho, ao comité económico e social Europeu e ao comité das regiões*. Bruxelas.

- Correia, J. (2013). Avaliação da higroscopicidade de materiais correntes. *Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil*. FCT-UNL.
- Dias, F. (2017). Metodologia para avaliação técnica e de durabilidade de sinalização horizontal de rodovias de tráfico muito pesado, Grupo ARTERIS.
- Duran, A., Navarro-Blasco, I., Fernández, J. M., & Alvarez, J. I. (2014). Long-term mechanical resistance and durability of air lime mortars with large additions of nanosilica. *Construction and Building Materials*, 58, 147–158.
- Evangelista, L. (2003). Betão reforçado com fibras de aço. Aplicação de pavimentos industriais. *Monografia, Escola de Engenharia UFMG, Belo Horizonte, Brasil*.
- Faria, P. (2004). Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes”, *Tese de doutoramento em Engenharia Civil na especialidade de Reabilitação do Património Edificado*, FCT-UNL.
- Faria, P., Silva, V., Grilo, J., Carneiro, J., Branco, T., Mergulhão, D., & Antunes, R. (2012). Argamassas compatíveis com alvenarias históricas com base em cal hidráulica natural. *Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas Antigas de Alvenaria (CIREA2012), 4 de Maio de 2012, Reitoria da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa*.
- Gonçalves, N A. (2013). Caldas de Injecção Pré-Doseadas para Alvenarias Antigas. *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil*. IST - UL.
- Gomes, J. G. R. (2016). Caracterização experimental do comportamento reológico e mecânico de grouts com hidrófugo vegetal. *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil*. FCT - UNL.
- Gouveia, T. M. C. (2017). Grouts de injecção com nanopartículas de sílica na consolidação de alvenarias antigas. *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil*. FCT - UNL.
- Henriques, F. M. A. (1991). A Conservação do Património Histórico Edificado. *Memória 775*, 34 *Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)*.
- Henriques, F. M. A. (2011). Humidade em Paredes. *Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)*. ISBN: 9789724915920.

- Jorne, F., Henriques, F. M. A., & Baltazar, L. G. (2012). Grout injection in porous media with different internal structures. *In Proceeding of 14 International Conference - Structural Faults & Repair*, 3-5 July 2012, Scotland.
- Jorne, F., & Henriques, F. M. A. (2016). Evaluation of the grout injectability and types of resistance to grout flow. *Construction and Building Materials*, 122, 171–183.
- Jorne, F., Henriques, F. M. A., & Baltazar, L. G. (2015). Influence of superplasticizer, temperature, resting time and injection pressure on hydraulic lime grout injectability. Correlation analysis between fresh grout parameters and grout injectability. *Journal of Building Engineering*, 4, 140–151.
- Leaflet, T. (2008). Mode of Action of Superplasticizers for cement based construction materials. *BASF, The Chemical Company*.
- Martínez, I., Castillo, A., Martínez, E., & Castellote, M. (2013). Physico-chemical material characterization of historic unreinforced masonry buildings: The first step for a suitable intervention. *Construction and Building Materials*, 40, 352–360.
- Mateus, P. S. L. (2013). Betão Reforçado por Nanotubos de Carbono. *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil*, Universidade do Minho.
- Matos, J. P. B. (2013). Efeito da temperatura no comportamento de caldas de injeção à base de cal hidráulica natural na presença de policarboxilato. *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil*. FCT - UNL.
- Mendes, C. S. F. (2013). Reologia de misturas cimentícias com incorporação de superplastificante. *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil*. Universidade do Minho.
- Miguel, D. L. N. (2017). Influência do tipo e dosagem de hidrófugo na reologia de caldas de injeção. *Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil*. FCT - UNL.
- Moreira, I. S. C. (2018). Comportamento mecânico do betão reforçado com fibras. *Relatório de Estágio submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil*. ISEP.
- Oliveira, B. (2010). Análise numérica da representatividade de ensaios com macacos planos em paredes de alvenaria de pedra. *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil*, FEUP.

- Pinto, J. B., Pinto, A. P. F., & Gomes, A. (2013). Gesso e cal de construção. *Materiais de construção I*. IST. Adaptado de “Guía Práctica de la Cal y el Estuco”, Editorial de los Ofícios, León, Espanha, 1998, ISBN:84-9304227-0-6.
- Pagaimo, F. (2004). Caracterização Morfológica e Mecânica de Alvenarias Antigas. Caso de Estudo da Vila Histórica de Tentúgal. *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil*. FCT - UC.
- Piotrowski, D., & Cierniewski, C. (1982). Introduction to rheology. *Acta Haematologica Polonica*, 13 (3-4), 177–186.
- Raszewski, F. C., Schumacher R. F., & Hansen, E. K. (2008). Methods for Producing Hollow Glass Microspheres. *Savannah River National Laboratory, Aiken*.
- Rodríguez, C. (2012). Binders in historical buildings: Traditional lime in conservation. In J. M. Herrero & M. Vendrell (eds.), *International Seminar on Archeometry and Cultural Heritage*, 9, 91-112.
- Rosquoët F., Alexis A., Khelidj A., & Phelipot, A. (2003). Experimental study of cement grout: Rheological behavior and sedimentation. *Cement and Concrete Research*, 33, 713–722.
- Rosa, C. F. M. (2013). Caracterização de alvenarias de pedra antigas. *Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil*. FCT - UNL.
- Rosenbusch, C., & Holcomb, B. (2003). The beneficts of microspheres. *3M*, St. Paul.
- Sana, G., Sohaib, N., Seemab, F., & Mamoon R. (2018). Using Polypropylene Fiber in Concrete to achieve maximum strength. *Department of Civil Engineering, Capital University of Science & Technology*, Islamabad, Pakistan. ISBN: 978-1-63248-145-0
- Sequeira, A. C., Frede, D., & Gonçalves, P. (2007). Cal Hidráulica – Um ligante para a reabilitação. 2º Congresso. *Nacional de Argamassas de Construção (APFAC)* 22 - 23 de Novembro, Lisboa.
- Semenov, V. S., perfilov, V. A., & Oreshkin, D. V. (2016). Environmentally Safe Mortar and Grouting Solutions with Hollow Glass Microspheres. *Procedia Engineering*, 150, 1479-1484.
- Shahidan, S., Aminuddin, E., Noor, K. M., Raihan, N. I., Hannan, R., & Bahari, N. A. S. (2016). Potential of Hollow Glass Microsphere as Cement Replacement for Lightweight Foam Concrete on Thermal Insulation Performance. *International Symposium on Civil and Environmental Engineering. Sustainable and Advanced Construction Materials*, 20-21 December 2016, Wuhan, China.

- Simon, S., & Geyer D. (2008). Comparative testing of earthen grouts for the conservation of historic earthen architectural surfaces. *Terra 2008: The 10th International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architectural Heritage*, 1-5 February, 2008, Bamako, Mali.
- Theodoridou, M., Ioannou, I., & Philokyprou, M. (2013). New evidence of early use of artificial pozzolanic material in mortars. *Journal of Archaeological Science*, 40(8), 3263–3269.
- Valluzzi, M. R., Porto, F. da, & Modena, C. (2004). Behavior and modeling of strengthened three-leaf stone masonry walls. *Materials and Structures*, 37, 184-19.

RHEOLOGICAL CHARACTERIZATION OF INJECTION GROUTS PROPORTIONED WITH GLASS MICROSPHERES AND POLYPROPYLENE FIBERS

Luis G. Baltazar^{1*}, Fernando M.A. Henriques¹, João Botas¹, Maria Teresa Cidade²

¹ Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa (Portugal)

² Departamento de Ciência dos Materiais & Cenimat/i3N, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa (Portugal)

*e-mail: luis.baltazar@fct.unl.pt

ABSTRACT

Grouting is a consolidation method intended to improve strength in old stone masonry walls. It consists of the introduction of a binding agent, in a suspension form, to fill the internal cracks and voids of stone masonry walls. It will subsequently cure and set in a durable solid form, increasing the adhesion between the constitutive masonry elements. Consequently, it improves the masonry's load bearing capacity to vertical and to horizontal actions. The suspended particles in grout system have a significant influence on the penetration performance and rheology of the grout. Several researchers have investigated the fluidity and rheology of cementitious suspensions incorporating various additives and admixtures; however few researches have endorsed the contribution of the glass microspheres and polypropylene fibers in natural hydraulic lime-based grouts. The present study concerns the measurement of some relevant rheological properties for the purpose of grouting of stone masonry walls and how these properties are influenced by different dosages of glass microspheres and polypropylene fibers.

I. MOTIVATION

Most Portuguese and European built heritage is made with **stone masonry walls** (Fig. 1). Unfortunately, these masonries have **structural weaknesses** such as voids, fissures and poor monolithic behavior. **Grouting** is generally used as a mean of changing or improving the masonry's load bearing capacity to vertical and horizontal actions. A commonly used method for grouting is the grout injection, whereby the grout material, i.e. the **suspension of binder particles in an aqueous medium**, is forced by pressure into voids and fractures of stone masonry wall (Fig. 2)



Fig. 1 - View of Lisbon downtown [1]

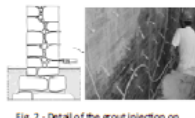


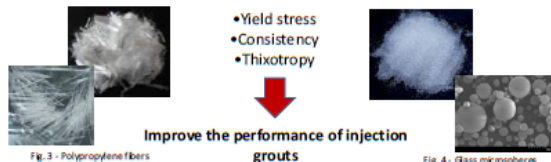
Fig. 2 - Detail of the grout injection on a stone masonry wall [2]

Grout injection is an **invisible retrofitting technique**, which is an advantage when working on the historic buildings. Moreover, it is an **irreversible technique** which means that a badly designed grout can lead to regrettable consolidation failures [3,4]

Among the various grouts characteristics, the **flowability** appears as one of the most determinant characteristics in the grouting performance, since it is important to ensure that the grout can flow and fill well the cracks and voids in the masonry core. For this reason, **rheology plays an important role** in injection grouts since it allows providing valuable data about the influence of composition on flowability of grouts

II. GOALS

This study aims to analyze the influence of polypropylene fibers (Fig. 3) and glass microspheres (Fig. 4) on **rheological properties** of grouts



III. MATERIALS

Natural hydraulic lime (NHL) is the most suitable binder for consolidation of stone masonry buildings due to its compatibility with the masonry characteristics in mechanical, physical and chemical aspects

Polypropylene (PP) fibers are 100% synthetic obtained from melt spinning of polypropylene. The use of PP fibers has increased in building materials due to its advantages in improving the mechanical properties of materials, such as flexure strength

Glass microspheres (GM) made out SiO_2 and a size range: 50-106 microns was used. GM are light-weight, chemically stable, frequently used as additives to reduce weight (density), improve buoyancy of materials and on reflective surfaces (reflective paint, reflective signs)

Polyacrylate-based **superplasticizer (SP)** conforming to ASTM C494-05 was used

IV. EXPERIMENTAL DETAILS

The experimental program was conducted using a NHL-based grouts proportioned with **different dosages** of PP fibers and glass microspheres as shown in table 1

Rheological measurements were performed by means of a **rotational rheometer** equipped with a **plate-plate geometry** as shown in Fig. 5

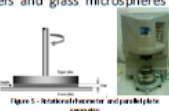


Figure 5 - Rotational rheometer with plate-plate geometry

Grout	NHL (wt%)	PP (wt%)	GM (wt%)	SP (wt%)
Grout 1	100	0	0	0
Grout 2	100	0	0	0
Grout 3	100	0	0	0
Grout 4	100	0	0	0
Grout 5	100	0	0	0
Grout 6	100	0	0	0
Grout 7	100	0	0	0
Grout 8	100	0	0	0
Grout 9	100	0	0	0
Grout 10	100	0	0	0
Grout 11	100	0	0	0
Grout 12	100	0	0	0
Grout 13	100	0	0	0
Grout 14	100	0	0	0
Grout 15	100	0	0	0
Grout 16	100	0	0	0
Grout 17	100	0	0	0
Grout 18	100	0	0	0
Grout 19	100	0	0	0
Grout 20	100	0	0	0
Grout 21	100	0	0	0
Grout 22	100	0	0	0
Grout 23	100	0	0	0
Grout 24	100	0	0	0
Grout 25	100	0	0	0
Grout 26	100	0	0	0
Grout 27	100	0	0	0
Grout 28	100	0	0	0
Grout 29	100	0	0	0
Grout 30	100	0	0	0
Grout 31	100	0	0	0
Grout 32	100	0	0	0
Grout 33	100	0	0	0
Grout 34	100	0	0	0
Grout 35	100	0	0	0
Grout 36	100	0	0	0
Grout 37	100	0	0	0
Grout 38	100	0	0	0
Grout 39	100	0	0	0
Grout 40	100	0	0	0
Grout 41	100	0	0	0
Grout 42	100	0	0	0
Grout 43	100	0	0	0
Grout 44	100	0	0	0
Grout 45	100	0	0	0
Grout 46	100	0	0	0
Grout 47	100	0	0	0
Grout 48	100	0	0	0
Grout 49	100	0	0	0
Grout 50	100	0	0	0
Grout 51	100	0	0	0
Grout 52	100	0	0	0
Grout 53	100	0	0	0
Grout 54	100	0	0	0
Grout 55	100	0	0	0
Grout 56	100	0	0	0
Grout 57	100	0	0	0
Grout 58	100	0	0	0
Grout 59	100	0	0	0
Grout 60	100	0	0	0
Grout 61	100	0	0	0
Grout 62	100	0	0	0
Grout 63	100	0	0	0
Grout 64	100	0	0	0
Grout 65	100	0	0	0
Grout 66	100	0	0	0
Grout 67	100	0	0	0
Grout 68	100	0	0	0
Grout 69	100	0	0	0
Grout 70	100	0	0	0
Grout 71	100	0	0	0
Grout 72	100	0	0	0
Grout 73	100	0	0	0
Grout 74	100	0	0	0
Grout 75	100	0	0	0
Grout 76	100	0	0	0
Grout 77	100	0	0	0
Grout 78	100	0	0	0
Grout 79	100	0	0	0
Grout 80	100	0	0	0
Grout 81	100	0	0	0
Grout 82	100	0	0	0
Grout 83	100	0	0	0
Grout 84	100	0	0	0
Grout 85	100	0	0	0
Grout 86	100	0	0	0
Grout 87	100	0	0	0
Grout 88	100	0	0	0
Grout 89	100	0	0	0
Grout 90	100	0	0	0
Grout 91	100	0	0	0
Grout 92	100	0	0	0
Grout 93	100	0	0	0
Grout 94	100	0	0	0
Grout 95	100	0	0	0
Grout 96	100	0	0	0
Grout 97	100	0	0	0
Grout 98	100	0	0	0
Grout 99	100	0	0	0
Grout 100	100	0	0	0

The steady-shear data were obtained in **controlled shear rate mode** over a shear rate range of 0-300 s^{-1} (up and down flow curve were obtained)

Considering the **shear-thinning behaviour** of these grouts and based on other studies [4-6], the **Herschel-Bulkley model** (Eq. 1) was used to describe the rheological behaviour of these grouts

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (\text{Eq. 1})$$

V. RESULTS

Rheological properties of injection grouts are decisive in the fresh performance of grouts and therefore the success of the consolidation operation

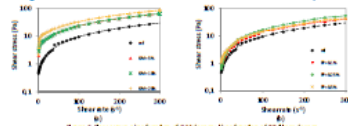
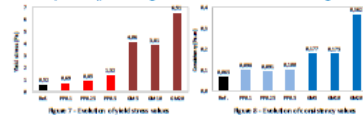


Figure 6 - Flow curves (shear stress vs. shear rate) for different dosages of GM and PP fibers

The flow curves of NHL grouts as a function of GM and PP fibers dosage are presented in Fig. 6

Fig. 7 and 8 present the evolution of the yield stress and consistency, respectively, according to the additive used and its dosage



A **smaller** yield stress and consistency is better than a larger one. From the rheological parameter values it is clear that the increase of the dosage of both additives **decreases the flowability** of the grout

Surprisingly the **PP fibers** showed to be the **less harmful from the rheological point of view**. This behavior can be explained by the orientation of the PP fibers in the **flow direction**. On the other hand, the poor performance of GM may be due to the fact that some GM are not perfectly spherical because they broke during the mixing process

The contribution of PP fibers and GM on the **thixotropic behaviour** of the grout is present in table 2

Grout	Thixotropy (Pa.s)
Grout 1	1.00
Grout 2	1.00
Grout 3	1.00
Grout 4	1.00
Grout 5	1.00
Grout 6	1.00
Grout 7	1.00
Grout 8	1.00
Grout 9	1.00
Grout 10	1.00
Grout 11	1.00
Grout 12	1.00
Grout 13	1.00
Grout 14	1.00
Grout 15	1.00
Grout 16	1.00
Grout 17	1.00
Grout 18	1.00
Grout 19	1.00
Grout 20	1.00
Grout 21	1.00
Grout 22	1.00
Grout 23	1.00
Grout 24	1.00
Grout 25	1.00
Grout 26	1.00
Grout 27	1.00
Grout 28	1.00
Grout 29	1.00
Grout 30	1.00
Grout 31	1.00
Grout 32	1.00
Grout 33	1.00
Grout 34	1.00
Grout 35	1.00
Grout 36	1.00
Grout 37	1.00
Grout 38	1.00
Grout 39	1.00
Grout 40	1.00
Grout 41	1.00
Grout 42	1.00
Grout 43	1.00
Grout 44	1.00
Grout 45	1.00
Grout 46	1.00
Grout 47	1.00
Grout 48	1.00
Grout 49	1.00
Grout 50	1.00
Grout 51	1.00
Grout 52	1.00
Grout 53	1.00
Grout 54	1.00
Grout 55	1.00
Grout 56	1.00
Grout 57	1.00
Grout 58	1.00
Grout 59	1.00
Grout 60	1.00
Grout 61	1.00
Grout 62	1.00
Grout 63	1.00
Grout 64	1.00
Grout 65	1.00
Grout 66	1.00
Grout 67	1.00
Grout 68	1.00
Grout 69	1.00
Grout 70	1.00
Grout 71	1.00
Grout 72	1.00
Grout 73	1.00
Grout 74	1.00
Grout 75	1.00
Grout 76	1.00
Grout 77	1.00
Grout 78	1.00
Grout 79	1.00
Grout 80	1.00
Grout 81	1.00
Grout 82	1.00
Grout 83	1.00
Grout 84	1.00
Grout 85	1.00
Grout 86	1.00
Grout 87	1.00
Grout 88	1.00
Grout 89	1.00
Grout 90	1.00
Grout 91	1.00
Grout 92	1.00
Grout 93	1.00
Grout 94	1.00
Grout 95	1.00
Grout 96	1.00
Grout 97	1.00
Grout 98	1.00
Grout 99	1.00
Grout 100	1.00

The quantification of thixotropy was accomplished through the area between the up and down curve

VI. CONCLUSIONS

Based on the experimental results of the present study, the following conclusions can be remarked:

- A substantial increase in the yield stress and consistency values was found when the GM dosage was increased in the grout composition
- The use of the GM did not have the expected effect on the grouts' fluidity. The ball-bearing effect has not occurred; this is probably due to the fact that some spheres have been destroyed during the grout preparation process
- With the addition of PP fibers it is expected to have a slight adverse effect on rheological properties of grouts, but a significant improvement of the grout's durability (resistance to cracking for instance). For this reason, other investigations will be needed in order to better evaluate how to overcome this flowability loss (e.g. testing fibers with different lengths)
- The use of these additives (in particular the GM) accentuates the thixotropic character of the grouts. These additives may increase the bridging between elements and positively affect the building up of the grout's microstructure, which is good from the point of view of stability and pressure over the masonry during the first hours after the grouting operation

REFERENCES

- Website - <https://sites.fct.unl.pt/ecocore/pages/home> - consulted on March 4, 2019
- Baltazar, L.G., Henriques, F.M.A., Cidade, M.T. Rheology of natural hydraulic lime grouts for conservation of stone masonry-influence of compositional and processing parameters, *Fluids* 4(1), 2019, 13
- Binda, L., Baronio, G., Tiraboschi, C., Tedeschi, C. Experimental research for the choice of adequate materials for the reconstruction of the Cathedral of Noto, *Constr Build Mater*, 2003, 7, 629-639.
- Collepardi, M. Degradation and restoration of masonry walls of historical buildings. *Mater Struct*, 1990, 23(2), 81-102.
- Baltazar, L.G., Henriques, F.M.A., Cidade, M.T. Rheological characterization of injection grouts using rotational rheometry. In *Advances in Rheology Research*; Nova Science Publishers, New York, 2017, 13-42.
- Baltazar, L.G., Henriques, F.M.A., Cidade, M.T. Grouts with improved durability for masonry consolidation: An experimental study with non-standard specimens, *Key Eng. Mater.*, 2017, 747 480-487